

Ralph H. Stelzer · Jens Krzywinski (Hrsg.)

# **ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN** in Produktentwicklung und Design 2019

Band 2





Ralph H. Stelzer · Jens Krzywinski (Hrsg.)  
**ENTWICKELN** ENTWERFEN **ERLEBEN** in Produktentwicklung und Design 2019  
Band 2





Ralph H. Stelzer · Jens Krzywinski (Hrsg.)

**ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN**  
in Produktentwicklung und Design 2019  
Band 2

Ralph H. Stelzer · Jens Krzywinski (Hrsg.)

**ENTWICKELN ENTWERFEN ERLEBEN** in Produktentwicklung und Design 2019  
Band 2

Band 1 ist erschienen bei TUDpress und Qucosa unter  
ISBN 978-3-95908-170-2  
<http://nbn:de:bsz:14-qucosa2-328486>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind  
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the  
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-171-9  
Erscheint zugleich digital (Open Access)  
auf Qucosa der SLUB Dresden unter  
<http://nbn:de:bsz:14-qucosa2-342089>

© 2019 Thelem Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH & Co. KG  
Strehleener Straße 22/24 | D-01069 Dresden  
Tel.: 0351/4721463 |  
<http://www.thelem.de>  
TUDpress ist ein Imprint von Thelem  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Layout und Satz: Technische Universität Dresden.  
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Albrecht Meixner/TU Dresden  
Printed in Germany.

# Inhalt

Finishing Perspective (Endbehandlung Perspektive) Ingmar S. Franke, Mario Linke, Christian Bendicks und Rainer Groh	9
Card Sorting basierter Ansatz zur Erarbeitung einer nutzungsgerechten Methodensammlung am Beispiel des IDE-Toolkits Martin Wiesner, Björn Kokoschko, Linh Bùi Duy und Laura Augustin	29
Feasibility-Labor“ – erste Vorstellung neuer Ansätze zur Optimierung der Designumsetzung im Automobilbau Knut Lender	41
MBSE-basierte Produktkonfiguratoren zur Analyse der Modularisierung bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme Florian Seiler, Lea-Nadine Schwede und Dieter Krause	55
Branchenübergreifendes Benchmarking von variantenreichen Produktportfolios auf Basis von Produktstrukturen Christian Wyrwich und Georg Jacobs	71
Aspekte der Authentizität bei der Umsetzung eines künstlerischen Entwurfs mit 3D-Software-Werkzeugen Wolfgang Steger, Christine Schöne und Helmut Nitsche	91
Das Visionsmodell: Präzise Darstellung von Entwicklungszielen Laura Augustin, Michael Schabacker	105
Wissen und Heterogenität in der Produktentwicklung Alexandra Göhring	111

Kombination der experimentellen und numerischen Simulation zur Entwicklung dreidimensionaler Elektronik Florian Schaller, Fabian Kayatz und Cedric Sanjon	123
Lösungsansätze für eine nachhaltigkeitsorientierte, interdisziplinäre Produktentwicklung Barbara Gröbe-Boxdorfer	133
Szenariobasierte Validierung von Produktprofilen in der frühen Phase der PGE-Produktgenerationsentwicklung Florian Marthaler, Vincent Kutschera, Jonas Reinemann, Nikola Bursac und Albert Albers	149
Vergleich von Produktinnovationsarten – Worin die Unterschiede wirklich begründet liegen Jonas Heimicke, Valentin Zimmermann, Monika Klippert, Markus Spadinger und Albert Albers	165
Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern – die überarbeitete VDI/VDE-Richtlinie 2424 Robert Watty, Christian Zimmermann und Gerhard Reichert	181
IM-UX – Fragebogen zu intrinsischer Motivation in der User Experience Jette Selent und Michael Minge	195
Konzept zur Identifikation relevanter Produkteigenschaften zur Unterstützung einer positiven User Experience Tina Schröppel, Jörg Miehlung und Sandro Wartack	205
User Experience Design für Sicherheitstechnik – Ansatz und Methodik bei Dräger Safety Marlene Vogel, Matthias Willner, Christian Wölfel und Jens Krzywinski	219
3D-volldigitalisierte Behandlungsplanung bei Lippen-Kiefer-Gaumenspalten Christiane Kunert-Keil, Dominik Haim, Karol Kozak, Ines Zeidler-Rentsch, Bernhard Weiland, Olaf Müller, Thomas Treichel und Günter Lauer	231

Automatische Vermessung der Knietopologie zur Unterstützung der Prothesenplanung für Kniearthroplastiken Sebastian Heerwald und Marc Mörig	243
Design und additive Fertigung von individualisierten biofunktionellen Implantaten in klinisch relevanten Dimensionen David Kilian, Philipp Sembdner, Stefan Holtzhausen, Tilman Ahlfeld, Christine Schöne, Anja Lode, Ralph Stelzer und Michael Gelinsky	253
Design von Medizinprodukten – Einfluss regulatorischer Anforderungen auf den Designprozess Christian Thomas	267
5G Sports – tragbare Technologiedemonstratoren im taktilen Internet Lisa-Marie Lüneburg, Emese Papp und Jens Krzywinski	277
Verbesserte Ergonomie durch Mensch-Roboter-Kollaboration als sozio-technisches System Daniel Rücker, Kristin Paetzold und Rüdiger Hornfeck	295
Modellbasierter Systems Engineering Ansatz zur effizienten Aufbereitung von VR-Szenen Atif Mahboob, Stephan Husung, Christian Weber, Andreas Liebal und Heidi Krömker	309
Akzeptanz und Nutzererleben von körpergetragenen Assistenzsystemen im industriellen Anwendungsbereich Emese Papp und Christian Wölfel	323
Modell zur Unterstützung von Designentscheidungen auf strategischer Unternehmensebene im Industrial Design Frank Thomas Gärtner	335
Der Einfluss stilistischer Merkmale einer Entwurfsvisualisierung auf die semantischen Produkteigenschaften Frank Mühlbauer	347

Konstruktionslösungen mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz Willi Gründer und Denis Polyakov	361
Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio zum Vergleich von Datenanalyseprojekten in der Produktentwicklung Sebastian Klement, Bernhard Saske, Stephan Arndt und Ralph Stelzer	375
Einsatz von Graphdatenbanken für das Produktdatenmanagement im Kontext von Industrie 4.0 Christopher Sauer, Benjamin Schleich und Sandro Wartzack	393
Predictive Quality Management mit modellbasierten Services in kollaborierenden Netzwerken Andreas Trautheim-Hofmann	409
Softwareentwicklung ECM/WCM im Spannungsfeld KMUs–Großunternehmen Oliver Schwarz und Christian Kowalewski	419

# Finishing Perspective (Endbehandlung Perspektive)

Ingmar S. Franke, Mario Linke, Christian Bendicks und Rainer Groh

## 1 Einleitung und Motivation

Vor dem Hintergrund des Konferenzrahmens: Entwerfen, Entwickeln, Erleben möchten wir dem Leser den **Entwurf** unseres geometrischen Ansatzes einer Objekt-basierten Perspektivischen Optimierung (OPO), das **Entwickeln** unseres computergrafischen Algorithmus und das **Erleben** und Arbeiten im Designentscheidungsprozess nahebringen. Den OPO-Algorithmus vergleichend wollen wir einen zweiten Ansatz, eine Kamera-basierte Perspektivische Optimierung (KPO), darlegen.

Unser konkretes Anliegen ist es, **Designentscheidungsprozesse** zu **unterstützen**, indem wir digitale und analoge Mittel und Werkzeuge optimieren und zusammenbringen. Das heißt, nicht nur optimierte computergrafische Algorithmen, sondern auch ein design-gerechtes Verhalten des Betrachters vor einer Bildfläche sind entscheidend. Je nach Rolle des Betrachters (Entscheider, Designer, Präsentator, Moderator) liegen spezifische Rahmenbedingungen, Handlungs- sowie Arbeitsabläufe im Designentscheidungsprozess vor.

Dem designorientierten Betrachter soll die virtuelle Szene weitestgehend realistisch erscheinen. Einerseits befindet sich der Betrachter im Zentrum des Visualisierungssystems. Andererseits liegt das zu gestaltende Objekt im Fokus des Designers. **Designer und Objekt befinden sich in einem Dialog, wobei Proportion und Orientierung** virtueller Objekte für das wahrnehmungsrealistische Empfinden von Wichtigkeit sind (siehe Abbildung).

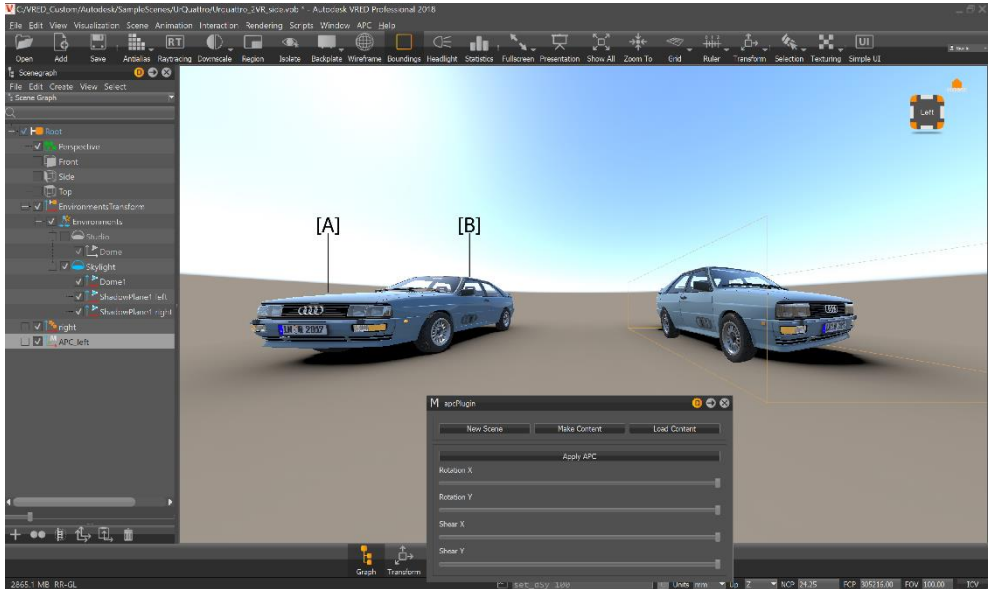


Abbildung 1: Gegenüberstellung von „unnatürlich“ wirkendem Abbild (links) und „optimiertem“ Abbild (rechts) ein und desselben geometrischen Modells, bei einem symmetrischen Kameraöffnungswinkel von 100°, mittels Autodesk VRED™, Python Plug-In (Audi AG).

**Wahrnehmungsrealismus** heißt das Berücksichtigen der visuellen Wahrnehmung des Menschen als Teil des Bildentstehungsprozesses (Rendering Pipeline). Zur Projektion von Objekten auf die Bildebene dient gewöhnlich die zentralperspektivische Projektion unter Verwendung des einfachen Kameramodells in der Computergrafik, das der frühen Camera Obscura nachempfunden ist (Alberti, 2002). In diesem Standard-Kameramodell werden der Betrachter und dessen Wahrnehmung übergangen. Die Grenzen der perspektivischen Projektion werden erkennbar, sobald sich Objekte abseits der Blickrichtung befinden (Yankova & Franke, 2008a), (Steinicke, Bruder & Kuhl, 2010). Diese Objekte „leiden“ in der Regel unter Verzerrungen – in der Gestaltung spricht man unter anderem von perspektivischen Verzeichnungen. Eine gute Gestalt hingegen wirkt beim Betrachter nach. Neueste Erkenntnisse lassen verlauten, dass bei der visuellen Wahrnehmung einer ästhetischen Gestalt zusätzliche Gehirnareale aktiviert werden (Belfi et al., 2019).



**Monoperspektivische** Darstellungen, damit sind Abbilder durch Zentralprojektionen gemeint, die lediglich ein Projektionszentrum beziehungsweise Augpunkt besitzen, sind aufgrund der Projektionsvorschrift mehr oder weniger starken Proportionsveränderungen unterworfen (siehe Abbildung). Solche perspektivischen Verzeichnungen erschweren den Vergleich von Objekten untereinander – beispielsweise im Designentscheidungsprozess. Zentralprojektionen mit nur einem Projektionszentrum erschweren eine objektive Bewertung der Produktgestalt (Franke, Pannasch, et al., 2008). Das Standard-Kameramodell ist mit den Problemen wahrnehmungsrealistischer Darstellung ursächlich verbunden.

Für die Problemlösung erläutern wir den Einfluss der sogenannten **Multiperspektive**. Mit einer multiperspektivischen Darstellung, damit meinen wir die Verwendung von mehreren Projektionszentren beziehungsweise Augpunkten, kann perspektivischen Verzerrungen entgegengewirkt werden (Franke et al., 2007). Zu diesem Zweck stellen wir zwei Verfahren zum Erzeugen von multiperspektivischen Bildern vor, die beim Betrachten auf einem flachen Ausgabemedium realistische räumliche Eindrücke erwecken. Bei unserem Optimierungsansatz des Abbildungsverfahrens besteht für den Betrachter die Option, zwischen zwei Konstellationen bezüglich der Ausrichtung abzubildender Objekte zu entscheiden, was sich aus unserem Ansatz zur Optimierung der Perspektive ergibt (siehe Abbildung).

Die Relevanz einer perspektivischen Optimierung für das Automobildesign (Exterieur) lässt sich vor allem wie folgt begründen: Im Bereich der Visualisierung von Produktentwürfen kommen großflächige Displays und damit weitwinklige Abbildungen zum Einsatz, beispielsweise Visualisierungen auf sogenannten Powerwalls. Diese und vergleichbare Visualisierungstechnologien, wie ShowRooms, werden für Designentscheidungen herangezogen. Der Designentscheidungsprozess ist eine wichtige Aufgabe und ein Arbeitsablauf innerhalb der Entwicklung neuer Automobile. Visualisierungstechnologien, die in diesem Zusammenhang zum Einsatz kommen, müssen daher ein möglichst natürliches und realistisches Bild der zu visualisierenden Objekte bereitstellen. Eine Lösung ist die Multiperspektive.

## 2 Verwandte Arbeiten

Multiperspektivische Bildgebung ist ein Konzept der Visualisierung, um mehrere Ansichten eines Objekts oder einer dreidimensionalen Szene in ein Bild zu integrieren (Hockney, 2001; Rademacher & Bishop, 1998; Vallance & Calder, 2006; Yu & Mcmillan, 2004). Dabei sollte die Räumlichkeit einer dreidimensionalen Szene hinsichtlich ihrer Objektproportionen erhalten bleiben. Gleichzeitig sollten die kombinierten Ansichten für den Beobachter leicht erkennbar sein (Franke, Wojdziak & Kammer, 2013; Yu & Mcmillan, 2004). In dieser Hinsicht behaupten (Zorin & Barr, 1995), dass die Transformation von Objekten relevant ist, um wahrnehmungskonforme Bilder zu erzeugen. Kugelförmige Objekte müssen kreisförmig visualisiert werden, und Linien kubischer Objekte sollten in multiperspektivischen Bildern gerade sein (Groh, 2005; Ware, 1900). Der Ansatz von (Zorin & Barr, 1995) ermöglicht die Verringerung geometrischer Verzerrungen in computergenerierten und fotografischen Bildern, indem Sichttransformationen in einer Nachverarbeitungsphase des Rendering-Prozesses erstellt werden. Modifikationen auf der Bildebene werden von (Carroll, 2009) genutzt, um Formen und gerade Linien einer Szene beizubehalten, die vom Benutzer markiert werden. (Zelnik-Manor, Peters & Perona, 2005) entwickelten ein Verfahren zum Erstellen von Panoramen aus Bildern, die von einem einzigen Blickpunkt aus aufgenommen wurden, ohne erkennbare Verzerrungen im Hintergrund und an Objekten. Ein weiterer Ansatz zur Erzielung der Multiperspektive besteht darin, das Standard-Kameramodell durch Verwendung eines Multiprojektions-Rendering-Algorithmus mit mehreren Kameras zu erweitern (Singh, 2002; Yu & Mcmillan, 2004; Yu, McMillan & Sturm, 2008). Das „endgültige“ Bild ist eine Komposition dieser Kameraansichten. (Agrawala, Zorin & Munzner, 2000) entwickelten ein Framework für die Wiedergabe multiperspektivischer Bilder aus dreidimensionalen Modellen auf der Grundlage räumlich unterschiedlicher Projektionen. Das Konzept von (Coleman & Singh, 2004) funktioniert auch mit mehreren Kameras. Im Gegensatz dazu wird das Bild aber von einer einzigen Master-Kamera gerendert. Die anderen Kameras, die auch als Lakaiken bezeichnet werden, definieren eine Verformung der Szenenobjekte. Die Transformation der Geometrie von Objekten oder die geänderte Ausrichtung von Teilen davon kann zur Erstellung von multiperspektiven Bildern verwendet werden.

### 3 Relevanz wahrnehmungskonformer Darstellung für die Kommunikation

Die **visuelle Wahrnehmung** feinsten Ausprägungen einer Gestalt beschränkt sich auf einen winzigen Bereich der Netzhaut. Die sogenannte Fovea Centralis deckt nur zwei Blickwinkel ab (Findlay & Gilchrist, 2003; Hunziker, 2006). Danach sind Bewegungen des Auges, des Kopfes und des Körpers notwendig, um die foveale Sicht dauerhaft auf Objekte auszurichten. Unter normalen Betrachtungsbedingungen ist das foveale Sehen von Objekten in der Nähe der peripheren Grenzen des Sichtfelds nicht möglich. Demzufolge ist der Betrachter mit der Form von Objekten in der Nähe der optischen Achse besser vertraut und sollte entsprechende Erwartungen an die Form von Objekten in perspektivischen Darstellungen richten.

Für eine effektive Kommunikation müssen gemeinsame konzeptionelle Grundlagen (Clark, 1996) und gemeinsame **Aufmerksamkeit** geschaffen werden. Zu diesem Zweck müssen die Teilnehmer einer gemeinschaftlichen Aktivität die Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und das Wissen der jeweils anderen Person ableiten. In interaktiven dreidimensionalen virtuellen Umgebungen kann der Benutzer häufig nicht auf das Sichtfeld und den Gegenstand der visuellen Aufmerksamkeit anderer schließen (Hindmarsh, Fraser, Heath, Benford & Greenhalgh, 2000). Geste, Haltung und Blickrichtung sind nützliche Indikatoren für gemeinsame Aufmerksamkeit, sozialen Status, kommunikative und soziale Absichten. Dies gilt für Mensch-zu-Mensch (Mehrabian, 1968; Tomasello, 2010) sowie für computervermittelte Kommunikation (Bailenson, Garland, Iyengar & Yee, 2006; Vinayagamoorthy, Steed & Slater, 2008). Zusammenfassend können wahrnehmungsrealistische Projektionsmethoden zum Realismus von Gestalt und Verhalten von Betrachtern beitragen.

### 4 Einschränkungen der perspektivischen Projektion in der Computergrafik

Das **Standard-Kameramodell** bildet in der Computergrafik eine virtuelle dreidimensionale Szene auf eine zweidimensionale Fläche ab. Das Modell orientiert sich, wie eingangs erwähnt, an den Regeln der Camera Obscura, das Ursprungsmodell optischer und virtueller Kameras. Die Transformation des virtuellen Raums auf die Bildebene der Kamera folgt den Gesetzmäßigkeiten der perspektivischen Projektion (Angel & Shreiner, 2012; Foley et al., 1990; Watt, 1993).

Das Abbild eines Objektes entsteht beim Abbildungsverfahren beziehungsweise beim Rendering-Prozess aus den Schnittpunkten der Bildebene mit allen Strahlen, ausgehend vom Projektionszentrum zu dreidimensionalen Punkten. Die Projektion ergibt eine perspektivische Ansicht entlang der Blickrichtung der Kamera. **Die Zentralprojektion behandelt alle abzubildenden Objekte gleich.** Als Konsequenz daraus erscheinen Objekte mit zunehmender Entfernung zur Blickrichtung im Bild gedehnt, das heißt „verzeichnet“. Insbesondere, wenn Objekte von einer geschlossenen gekrümmten (konvexen) Oberfläche umgeben sind (Groh, 2005, 2014) und mit einem großen Öffnungswinkel projiziert werden, wird diese Verzeichnung als unnatürlich angesehen (Franke, Pannasch, et al., 2008; Yankova & Franke, 2008b). Dieser Effekt ist deutlich erkennbar an Kugeln, Säulen oder eben auch Automobilen. (Ware, 1900) hat bereits Anfang des letzten Jahrhunderts eine Abhandlung aus Sicht der Architektur veröffentlicht, die eine gestalterische Lösung aufzeigt. Durch Zentralprojektion erzeugte abgebildeten Objekte zeigen eine räumliche Orientierung, die also nicht der **Erwartungshaltung** des Betrachters entspricht. Das meint, Objekte verfügen also nicht nur über eine **Position**, sondern besitzen auch eine **Ausrichtung im Raum**. Die Position und die Ausrichtung von Dialogobjekten im Sinne der Narration sind gestalterische Aspekte, die das Standard-Kameramodell bei der Abbildung derselben nur unzureichend berücksichtigen kann. Es ergeben sich **gestalterische Herausforderungen und Chancen** im Abbildungsprozess (Franke, Ulrich & Zitzmann, 2005).

## 5 Der künstlerisch gestalterische Ansatz aus Malerei und Architektur

Die Darstellung einer Gestalt hat in der bildenden Kunst eine lange Tradition. Insbesondere Malerei und Architektur haben sich „verschrieben“, die Proportionen und die Orientierungen von Objekten und Situationen **der Umwelt als Maßstab** anzunehmen und dies zu analysieren, um Regeln beziehungsweise Handlungsanweisungen zur Erzeugung **von natürlich wirkenden Darstellungen** zu schaffen. Ein genauerer Blick auf Regeln und historischen Konzepte dieser Künste scheint daher hilfreich zu sein, um neue Ansätze für computergestützte Visualisierungsmethoden zu identifizieren.

Ein wichtiger Aspekt im gestalterischen Bestreben ist es, die Wirklichkeit möglichst realistisch abzubilden. Dazu eignen sich Motive, wie beispielsweise

Menschen in Landschaften oder von/in Gebäuden. Künstler, wie Leonardo da Vinci (da Vinci, 1925), Albrecht Dürer (Dürer, 1525), Leon Battista Alberti (Alberti, 2002) haben etliche wissenschaftsähnliche Abhandlungen verfasst. Ein berühmtes Beispiel wurde unter anderem von Leonardo da Vinci vorgestellt. Sein "Der Vitruvianische Mensch" (1492) veranschaulicht die Zusammensetzung des menschlichen Körpers anhand geometrischer Proportionen (Vitruvius, 1964). Weiterführende Analysen von Gemälden aus der **Renaissance** zeigen, dass die Künstler mit den gleichen Herausforderungen konfrontiert waren, wie die gegenwärtige Computergrafik bei der Abbildung einer dreidimensionalen Szene auf eine zweidimensionale Ebene (Groh, 2005). Die Regeln für die Abbildungsvorschrift dreidimensionaler Inhalte basieren auf der perspektivischen Projektion. Dass das - wie so oft vermeintlich angenommen - nicht erst seit der Renaissance so ist, zeigen wissenschaftliche Erkenntnisse aus der (griechischen) **Antike**, wo realistische Perspektive bereits in zahlreichen bildhaften Werken und in der Architektur zu finden sind (Breitling, 2003; Franke, 2015; Spiteris, 1966). Zur Analyse des „menschlichen Faktors“ und seiner Anwendbarkeit in computergenerierten Bildern wird durch Martin Zavesky und anderen unter anderem das Bild „Der Zinsgroschen“ von Masaccio (1428) diskutiert (Wojdziak, Zavesky, et al., 2011; Zavesky et al., 2011). Zur Analyse des „menschliche Faktors“ und seiner Berücksichtigung in architektonischen Bauwerken sei an dieser Stelle auf einen Beitrag von Ingmar Franke zum Parthenon, dem Tempel auf der Athener Akropolis, verwiesen (Franke, 2015). Ein weiteres Beispiel ist die bewusste Deformierung von Stifterfiguren in großen Kirchen, die weit oberhalb des Betrachters platziert werden sollten. Häufig wurden deren Köpfe als Ellipsoid modelliert, vertikal gedehnt. Von unten erscheint deren Kopfform normal ausgeprägt (Franke, 2015).

Zwischen Bildern, Gemälden, Architekturen einerseits und computergenerierten Abbildern von dreidimensionalen Geometrien andererseits besteht jedoch ein entscheidender Unterschied. Erstgenannte Werke sind direkt vom Menschen geschaffen. Ein Computersystem hingegen berechnet ein Abbild nach mathematischen Projektionsregeln. Künstler integrieren ihren „menschlichen Faktor“ in Bildern, weil sie Bilder auf Basis ihrer visuellen Erfahrungen, gesammelten Eindrücke und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen regelrecht komponieren beziehungsweise montieren - das meint

beispielsweise verschiedene Perspektiven, Blicke oder Ansichten, zeitliche Zustände, Geschichten oder Bedeutungserweiterungen (Märe) in Bildwerke zu implementieren.

## 6 Modellvisualisierung für den Designentscheidungsprozess

Die zuvor ausgeführten Erkenntnisse und Regeln gelten in gleicher Weise bei der Visualisierung, beispielsweise in der Automobilindustrie und hier insbesondere mit Blick auf den Designentscheidungsprozess. Die folgende Bildmatrix gibt einen Überblick (siehe Tabelle). Die Fahrzeuge werden im Abbildungsverfahren unterschiedlich behandelt. Es scheint so, dass sich die Kamera bei der Abbildung einiger Fahrzeuge zugewandt hat, da im Ergebnisbild nur wenige perspektivische Verzeichnungen zu erkennen sind. Die Lösung ist, dass diese Abbilder ein eigenes Projektionszentrum besitzen, das sich an der Gestalt des abzubildenden Fahrzeugs orientiert. Daher ist das Gesamtabbild als multiperspektivisch anzusehen. Die durch Automobildesigner entworfenen Proportionen und damit Gestalt des Fahrzeuges bleibt weitestgehend erhalten – die abgebildete Form des Fahrzeuges besitzt durch die multiperspektivische Visualisierung eine gestalterische Kohärenz. Fahrzeuge, die ohne eigenes Projektionszentrum visualisiert werden, enthalten dagegen perspektivische Verzeichnungen. Die Optimierung der Perspektive eröffnet darüberhinausgehend die Möglichkeiten, die Fahrzeuge an einer Linie oder kreisförmig auszurichten (siehe Tabelle 1).

Um eine **Vergleichbarkeit der Form und Gestalt** zu gewährleisten, basieren die Fahrzeuge auf ein und derselben dreidimensionalen Datengrundlage. Insbesondere die seitlichen Anteile des einen verzerrten Fahrzeuges, der Frontbereich [A] und Seitenbereich [B], sind von perspektivischen Verzeichnungen betroffen (markiert, siehe Abbildung 1). Dieser monoperspektivische Bildanteil, also das „verzeichnete“ Fahrzeug ist im mathematischen Sinn zwar „korrekt“ abgebildet, aber der visuelle Eindruck ist, ein „unnatürliches“ Bild zu betrachten, was zu Ablehnung führt (Franke, Pannasch, et al., 2008; Yankova & Franke, 2008b). Ein wesentliches Merkmal des Designprozesses unter Verwendung von Visualisierungssystemen sollte demzufolge die Verwendung von multiperspektivischen Abbildungsverfahren sein, um wahrnehmungsréalistische Bilder für den Designentscheidungsprozess bereitzustellen.



















[D1]			
	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0
[D2]			
	OPO: Sxy=1; Rxy=1	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=1; Rxy=1
[D3]			
	OPO: Sxy=1; Rx=1; Ry=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=1; Rx=1; Ry=0
[F1]			
	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0
[F2]			
	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=1; Rxy=1
[F3]			
	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=0; Rxy=0	OPO: Sxy=1; Rx=1; Ry=0

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Abbildungsergebnissen - perspektivisch „verzeichnet“ und optimiert. Kameraöffnungswinkel FoVh=100°; von der optischen Kamera ausgelenkte Objekte jeweils in der Lage:  $h=\pm 31^\circ$ ;  $v=+9^\circ$ , ansonsten bei  $0^\circ$ . Standort des Betrachters: mittig vor dem Bild. Auge auf einer Höhe von 1.8m. Technologie Autodesk VRED™, Python OPO-Plug-In.

## 7 Umsetzung der Multiperspektivischen Bildgebung in der Computergrafik

Im letzten Abschnitt wurde die Multiperspektive als Lösung für die Erstellung wahrnehmungsnaher Bilder im Design hervorgehoben. Die Anwendbarkeit in der Computergrafik impliziert eine Modifikation des Standard-Kameramodells in der Computergrafik, da eine einzelne Betrachtungstransformation die Anforderungen der multiperspektivischen Bildgebung nicht erfüllen kann. Ansätze zur Beeinflussung des Ergebnisses des Bilderzeugungsprozesses können aufgezeigt werden. Diese müssen die Anforderungen für das multiperspektive Rendern einer dreidimensionalen Szene erfüllen.

Die folgenden zwei Unterabschnitte beziehen sich auf Ansätze des multiperspektiven Renderns und der Anpassung von Techniken, die zuvor von Malern und Künstlern eingesetzt wurden. Es werden zwei Algorithmen im Detail vorgestellt, um dreidimensionale Szenen zu visualisieren, die wahrnehmungsrealistisch auf Betrachter wirken. Zunächst wird ein Objekt-basierter Algorithmus (OPO) eingeführt, der die Geometrie von Objekten manipuliert. Anschließend wird ein Kamera-basiertes Optimierungserfahren (KPO) zur Erstellung multiperspektivischer Bilder vorgestellt (Franke, 2015). Beide Ansätze werden einem Vergleich unterzogen.

### 7.1 Objekt-basierte Perspektivische Optimierung (OPO)

Die algorithmische Lösung zur perspektivischen Optimierung, die das Konzept der multiperspektiven Bildgebung umsetzt, wurde in (Franke, 2015; Franke et al., 2007) vorgestellt. Die Technik gehört zur Klasse der geometrischen Modifikationen. Das Verfahren wurde auf abstrakte Objekte wie Kugeln und Säulen angewendet. Es wird als Objekt-basierte Perspektivische Optimierung (OPO) bezeichnet und ist vom Ansatz der Kamera-basierten Perspektivischen Optimierung zu unterscheiden, die anschließen beschrieben ist. Der Objekt-basierte Algorithmus führt affine Transformationen durch, um die Geometrie von Objekten direkt zu ändern. Diese Objekte (so genannte Dialogobjekte nach (Groh, 2005)) werden so visualisiert, dass ihre Proportionen auf der Bildebene weniger verzeichnet erscheinen. Mit diesem Verfahren können nur die Objekte beeinflusst werden, die selektiv von einer perspektivischen Verzerrung betroffen sind. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist, dass das Standard-Kameramodell aus der Computergrafik zum



Erstellen von Bildern verwendet werden kann. Es ist nicht notwendig, mehrere Ansichten zu rendern, wie dies bei bildbasierten Lösungen der Fall ist (Agrawala et al., 2000; Zorin & Barr, 1995). Um den multiperspektivischen Ansatz von Malern und Künstlern zu imitieren (Franke, 2015; Groh, 2005; Hockney, 2001), werden Rotations- und Scherungstransformationen verwendet.

Die wesentlichen Schritte des objektorientierten Algorithmus können zusammengefasst werden (Franke, 2015):

1. Bestimme den Objektschwerpunkt im lokalen Kamerakoordinatensystem.
2. Berechne aus dieser relativen Lage zur Kamera die Scherungsfaktoren.
3. Berechne die Rotationswinkel.
4. Drehe bezüglich der Rotationswinkel das Objekt um die x- und y-Achse.
5. Führe eine Schertransformation mit Hilfe der Schermatrix durch, die sich aus den zuvor berechneten Scherfaktoren ergibt.

Die somit visualisierten peripheren Objekte werden aufgrund ihrer einzelnen zusätzlichen Hauptfluchtpunkte weniger verzeichnet dargestellt. Durch das Optimieren der Abbildungsvorschrift einzelner Objekte werden die Perspektiven in eine ursprüngliche monoperspektivische Szenenansicht eingebettet. Das Bild der dreidimensionalen Szene wird multiperspektivisch dargestellt, da jede Gestalt ihre eigene Perspektive besitzt. Daher werden die Proportionen der Gestalt in korrekten Beziehungen visualisiert und die Ausrichtung der Dialogobjekte wird angepasst, um der visuellen menschlichen Erfahrung gerecht zu werden. Die OPO, die auf geometrischen Änderungen basiert, ist jedoch nur ein Ansatz. Ein anderes Verfahren wird nachfolgend angerissen (Franke, 2015).

## 7.2 Kamera-basierte Perspektivische Optimierung (KPO)

Der Rendering-Prozess ermöglicht die Modifikation der Projektionsebene als ein alternatives Verfahren zum Erzeugen wahrnehmungsangepasster Bilder, die auf mehreren Perspektiven basieren. Die Kamera-basierte Perspektivische Optimierung (KPO) wird durch die Verwendung mehrerer Kameras erreicht, die nach vordefinierten Regeln kombiniert werden. Als Vorbild dienen

wiederum Gemälde der Maler der Renaissance. Mehrere Kameras simulieren die sukzessive Verschiebung der menschlichen Aufmerksamkeit. Der Algorithmus erstellt ein Kamera-Netzwerk, das aus einer Masterkamera und mehreren Objektkameras besteht. Die Objektkameras übernehmen die Parameter der Masterkamera. Die Blickrichtung einer Objektkamera „ahmt“ die jeweilige Blickrichtung des Betrachters nach. Jede Objektkamera rendert ein zugewiesenes Objekt oder einen Teil der dreidimensionalen Szene. Das Ergebnisbild besteht aus den gerenderten Einzelbildern jeder Kamera, sortiert nach der Szenentiefe der entsprechenden Objekte.

Beim Verschieben und Drehen der Masterkamera muss jede Objektkamera in Bezug auf die Position der Masterkamera im virtuellen Raum aktualisiert werden. Das betrifft sowohl die Position, die Ausrichtung und die Abbildungsreihenfolge.

Die wesentlichen Schritte des Kamera-basierten Algorithmus sind hier zusammengefasst (Franke, 2015):

1. Erstelle eine Objektkamera und weise ihr ein Objekt zu.
2. Richte die Objektkamera auf den Objektschwerpunkt aus.
3. Verschiebe die Bildebene in Richtung des Objektes.
4. Berechne die ursprüngliche Position des Objektes auf der Bildebene der Systemkamera in Bildkoordinaten.
5. Verschiebe das Objektbild an die zuvor berechnete Stelle.
6. Sortiere die Bildebenen nach der Tiefe.

Dementsprechend sind auch diese computergenerierten Bilder multiperspektivisch **und erzeugen auf diese Weise einen realistisch wirkenden, räumlichen Eindruck.**

### 7.3 Vergleich der beiden Ansätze, OPO und KPO

Ziel beider Verfahren ist es, computergrafische Algorithmen bereitzustellen, die perspektivische Verzeichnungen vermeiden, damit sich ein ungestörter Dialog zwischen Betrachter und betrachtetes Objekt etablieren kann. Durch Anwendung der perspektivischen Optimierung bleiben die Proportionen der Dialogobjekte im räumlichen Gesamtkontext auch bei großen Kameraöffnungswinkeln erhalten.

Bei der Wahl der Parameter ergeben sich gestalterische Spielräume, siehe Tabelle 1. für OPO. Zeile D3 lässt die Fahrzeuge links und rechts der Bildmitte in den richtigen Proportionen und einer geradlinigen Aufreihung erscheinen. Zeile D2 lässt die Fahrzeuge links und rechts der Bildmitte in den richtigen Proportionen und am Betrachter ausgerichtet erscheinen. Es werden unterschiedlich räumliche Konstellationen zwischen den Dialogobjekten ermöglicht, die für eine Designbewertung herangezogen werden können. Die Lösungsansätze (OPO und KPO) liefern bis auf Überdeckungssituationen dieselben Resultate. Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der beiden Optimierungsverfahren erläutert.

Der Algorithmus zur OPO verwendet eine nicht modifizierte Kamera, um multiperspektivische Bilder zu erstellen. Die geometrischen Transformationen werden ausschließlich an Szenenobjekten ausgeführt. Die Anwendbarkeit ist auch in Echtzeitanwendungen gewährleistet. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit einer uneingeschränkten geometrischen Transformation von Objekten. Es ist möglich, die Schritte Scherung und Rotation unabhängig voneinander einzustellen. Die Einstellbarkeit dieser Transformationsschritte kann nützlich sein, um das Verhältnis und die Ausrichtung von Dialogobjekten in Bezug auf den Szenenkontext anzupassen. Zum Beispiel müssen einige Szenenkonfigurationen unerwünschten Schnittpunkten von Objekten entgegenwirken.

Im Gegensatz zur OPO ist die KPO restriktiver. Ihre Parameter sind weniger flexibel. Die funktionale Abhängigkeit vom Kamerasystem erlaubt nur eine absolute Anpassung. Eine einstellbare Manipulation von Proportion und Orientierung von Dialogobjekten ist nicht möglich. Trotzdem ermöglicht die Methode der KPO, die Eigenschaften auf eine wahrnehmungsorientierte Weise zu korrigieren. Daher kann das Verfahren der KPO in virtuellen Welten verwendet werden, um die Kommunikation zwischen Betrachter und Dialogobjekt zu unterstützen. Die KPO verursacht wesentlich weniger Objektdurchdringungen als die OPO (Franke & Zavesky, 2018).

Der Vergleich zeigt, dass beide Algorithmen, OPO und KPO, geeignet sind, um wahrnehmungsrealistische Bilder zu erzeugen. Beide Verfahren ergänzen sich in wesentlichen Teilen. Sie können gleichzeitig für verschiedene Objekte in virtuellen Szenen ohne gegenseitige Störung verwendet werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit vorliegendem Beitrag wurden Methoden der Computergrafik zur Erzeugung von wahrnehmungsrealistischen Bildern dreidimensionaler Szenen präsentiert und verglichen. Der Wahrnehmungsrealismus wird als Begriff definiert und erreicht, indem multiperspektivische Bilder erstellt werden, die auf den Regeln der perspektivischen Projektion basieren, die durch Merkmale der visuellen Wahrnehmung und Techniken der Renaissance-Malerei beziehungsweise der Antik-Architektur verstärkt werden. Die multiperspektivische Bildgebung wurde für eine wahrnehmungskonforme Darstellung am Beispiel der Automobilindustrie mit Blick auf Designentscheidungsprozesse eingesetzt.

Es werden multiperspektivische Rendering-Techniken als wertvolle Methoden identifiziert, um von Malern, Künstlern und Baumeistern verwendete Techniken in die dreidimensionale Computergrafik zu integrieren und für moderne Designentscheidungsprozesse anzubieten. Das Ziel sind wahrnehmungsrealistische Bilder, das heißt, in ihrer geometrischen Gestalt natürlich wirkende Visualisierungen. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen bezüglich perspektivischer Optimierungen in Abhängigkeit von der Form eines Objekts und seines Szenenkontexts ermöglichen die vorgestellten Algorithmen, OPO und KPO, eine individuelle Optimierung bestimmter Objekte, um die räumliche Kohärenz und Verständlichkeit der projizierten Szene zu verbessern.

Nach Analysen von Bild- und Bauwerken sowie des Standard-Kameramodells werden wichtige Themen im Zusammenhang mit der Computergrafik beschrieben. Das Szenario dialogorientierter Objekte in virtuellen Szenen, in dem eine angemessene Darstellung von Proportionen und Orientierung von besonderer Bedeutung ist, wurde gewählt, um die Vorteile von wahrnehmungsrealistischen Bildern zu unterstreichen. Es wurden zwei Methoden zum Erstellen multiperspektivischer Bilder eingeführt: eine Objekt-basierte und eine Kamera-basierte perspektivische Optimierung (OPO, KPO). Beide Verfahren unterscheiden sich zwar in ihrer Vorgehensweise, um Verzerrungen der Gestalt zu beheben, dennoch erzielen sie qualitativ sehr ähnliche, wahrnehmungsrealistische Bilder. Jedes Verfahren muss entsprechend des Kommunikationsumfeldes und vor dem Hintergrund der konkreten Kommunikationsziele ausgewählt und angepasst werden.

Die Objekt-basierte und die Kamera-basierte Perspektivische Optimierung (OPO, KPO) erzeugen individuelle wahrnehmungsrealistische Abbilder von dreidimensionalen Objekten. Der Kontext der Szene – sowohl der virtuelle als auch der reale – wird jedoch weder durch die OPO noch durch die KPO automatisch berücksichtigt. Der nächste Schritt wird die Erweiterung der Algorithmen basierend auf der Gesamtsituation sein. Damit sind sowohl der Aufbau der virtuellen Szene (bspw. zwei, drei oder mehrere Automobile) als auch der Betrachter oder Gruppen von Betrachtern (bspw. Designentscheidung) vor dem Display gemeint. Dabei muss unter anderem die perzeptuelle Neigung zu multiperspektivischen Bildern in computervermittelten Kommunikationsumfeldern durch empirische Anwenderstudien belegt werden. Es ist notwendig, systematisch die Wirksamkeit der OPO und KPO sowie Betrachtungsstandorte und Betrachtungsgegenstände zu vergleichen. Die analysierten Defizite bei nicht wahrnehmungsrealistischen Visualisierungen finden sich in verschiedenen Anwendungen. Das allgemeine Konzept der perspektivischen Optimierung (gilt für OPO und KPO) kann alle Arten von Visualisierungssystemen verbessern. Es eignet sich für Kontexte, die einen großen Sichtbereich und eine hohe Vergleichbarkeit aller Objekte gleichzeitig erfordern, wie dies bei Designentscheidungsprozesse vorliegt. Eine Studie im Werk der Audi AG ist angedacht und stellt einen Ausblick der Kooperation von uns dar.

## Literaturverzeichnis

- Agrawala, M., Zorin, D. & Munzner, T. (2000). Artistic Multiprojection Rendering. Proceedings of the Eurographics Workshop Rendering Techniques 2000 (26. - 28. Juni 2000, Brno) (S. 125–136). Gehalten auf der Eurographics Workshop Rendering Techniques 2000, Springer-Verlag.
- Alberti, L. B. (2002). Über die Malkunst = Della pittura. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Angel, E. & Shreiner, D. (2012). Interactive Computer Graphics: A Top-Down Approach with Shader-Based OpenGL. (6.). Boston: Addison-Wesley.
- Bailenson, J. N., Garland, P., Iyengar, S. & Yee, N. (2006). Transformed Facial Similarity as a Political Cue: A Preliminary Investigation. *Political Psychology*, 27(3), 373–385.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9221.2006.00505.x>
- Belfi, A. M., Vessel, E. A., Brielmann, A., Isik, A. I., Chatterjee, A., Leder, H. et al. (2019). Dynamics of aesthetic experience are reflected in the default-mode network. *NeuroImage*, 188, 584–597.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.12.017>

- Breitling, S. (2003, April 22). Bauformen und Baustile - Bauformen in der Griechischen Antike (Veranstaltungs-Dokumentation). Zugriff am 6.11.2013. Verfügbar unter: [http://baugeschichte.a.tu-berlin.de/bg/lehre/veranstaltung\\_dokumentation.php?det\\_id=146&veranst\\_id=48&veranstaltung=vorlesung&semester=](http://baugeschichte.a.tu-berlin.de/bg/lehre/veranstaltung_dokumentation.php?det_id=146&veranst_id=48&veranstaltung=vorlesung&semester=)
- Carroll, F. (2009). Aesthetic-Interaction: Exploring the Importance of the Visual Aesthetic in the Creation of Engaging Photorealistic VR Environments. *Theory and Practice of Computer Graphics*. Gehalten auf der Theory and Practice of Computer Graphics 2009, Cardiff University, United Kingdom: The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/TPCG/TPCG09/181-188>
- Clark, J. M. (1996). Contributions of Inhibitory Mechanisms to Unified Theory in Neuroscience and Psychology. *Brain and Cognition*, 30(1), 127–152. <https://doi.org/10.1006/brcg.1996.0008>
- Coleman, P. & Singh, K. (2004). Ryan: Rendering Your Animation Nonlinearly Projected. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'04*, 7.-9. Juni 2004, Annecy) (S. 129–156). Gehalten auf der 3rd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'04), New York: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/987657.987678>
- Dürer, A. (1525). *Underweysung der Messung mit dem Zirkel und Richtscheyt*. Nürnberg: Hieronymus Andreae.
- Findlay, J. M. & Gilchrist, I. D. (2003). *Active Vision: The Psychology of Looking and Seeing*. Oxford: Oxford University Press.
- Foley, J. D., van Dam, A., Feder, S. K. & Hughes, J. F. (1990). *Computer Graphics: Principles and Practice*. (Addison-Wesley Systems Programming Series) (2.). Reading [u. a.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Franke, I. S. (2015). *Untersuchungen zum Wahrnehmungsrealismus von Abbildern und Bildern: computergrafische Optimierungsansätze im Spannungsfeld von bildhafter Gestaltung, virtueller Architektur und visueller Wahrnehmung*. Dresden: TUDpress.
- Franke, I. S. & Bendicks, C. (2018, Dezember). Tutorial für das EPK-Plug-in – Ein Werkzeug zur Erstellung wahrnehmungskonformer Abbildungen in 3D-Visualisierungssoftware VREDTM. Gehalten auf der Projektpräsentation, Ingolstadt.
- Franke, I. S., Pannasch, S., Helmert, J. R., Rieger, R., Groh, R. & Velichkovsky, B. M. (2008). Towards Attention-Centered Interfaces: An Aesthetic Evaluation of Perspective with Eye Tracking. *Journal of the ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMCCAP)*, New York, 4(3), 1–13. <https://doi.org/portal.acm.org/citation.cfm?doid=1386109.1386111>
- Franke, I. S., Ulrich, A. & Zitzmann, M. (2005). An Approach Overcoming the Distance between Cyber and Culture. *Proceedings of the 3rd Global Conference Cybercultures - Exploring Critical Issues*

- (Cybercultures'03, 11. - 13. August 2005, Prague). Gehalten auf der 3rd Global Conference Cybercultures - Exploring Critical Issues (Cybercultures'03), Prague: Inter-Disciplinary Press. Verfügbar unter: <http://www.inter-disciplinary.net/critical-issues/cyber/cybercultures/project-archives/3rd/>
- Franke, I. S., Wojdziak, J. & Kammer, D. (2013). Gestenbasierte Interaktion in koordinierten multiplen Sichten. (M. Schenk, Hrsg.), Tagungsband: 16. IFF-Wissenschaftstage 18.-20. Juni 2013 und 10. Fachtagung »Digital Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme«, 213–220.
- Franke, I. S. & Zavesky, M. (2018). Perspektivkontrast Kp - Zur Relevanz von Proportion und Ausrichtung für computergrafische Visualisierungen. Beyond Rendering - Tagungsband zur 8. Tagung der Deutschen Gesellschaft für Geometrie und Grafik 2012 in Berlin (Seiten 48-63). Dresden: qucosa - Technische Universität Dresden, Dresden. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-237679>
- Franke, I. S., Zavesky, M. & Dachselt, R. (2007). Learning from Painting: Perspective-Dependent Geometry Deformation for Perceptual Realism. In B. Fröhlich, R. Blach & R.J. van Liere (Hrsg.), Proceedings of the 13th Eurographics Symposium on Virtual Environments 2007 and the 10th Immersive Projection Technology Workshop (IPT-EGVE 2007, 15. - 18. Juli 2007, Weimar) (S. 117–120). Weimar: Eurographics Association in Cooperation with Institute of Computer Graphics & Knowledge Visualization at Graz University of Technology and Institute of Scientific Computing at Technical University at Brunswick.
- Franke, I. S., Zavesky, M. & Wojdziak, J. (2008, Dezember). EPK Prototyp - Erweiterung des Präsentationsprogrammes „Autodesk Showcase“ um eine Komponente zur Erweiterten Perspektivischen Korrektur (EPK). Gehalten auf der Projektpräsentation, Ingolstadt.
- Groh, R. (2005). Das Interaktions-Bild: Theorie und Methodik der Interfacegestaltung. Dresden: TUDpress - Verlag der Wissenschaften.
- Groh, R. (2014). Ikonografie der Interaktion: Geschichte, Struktur und Funktion interaktiver Bilder. Dresden: TUDpress - Verlag der Wissenschaften.
- Hindmarsh, J., Fraser, M., Heath, C., Benford, S. & Greenhalgh, C. (2000). Object-focused interaction in collaborative virtual environments. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 7(4), 477–509. <https://doi.org/10.1145/365058.365088>
- Hockney, D. (2001). Secret Knowledge - Rediscovering the Lost Techniques of the Old Masters. London: Thames & Hudson.
- Hunziker, H. W. (2006). *Im Auge des Lesers: vom Buchstabieren zur Lese Freude: foveale und periphere Wahrnehmung*. Zürich: Transmedia.

- König, N. (2005). *Gestalterisch geordnete Computergrafik - Transformationsprinzip in OpenGL*. Dresden: Professur Mediengestaltung, Institut für Software- und Multimediatechnik, Fakultät Informatik, Technische Universität Dresden (Diplomarbeit).
- Mehrabian, A. (1968). Some referents and measures of nonverbal behavior. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 1(6), 203–207. <https://doi.org/10.3758/BF03208096>
- Rademacher, P. & Bishop, G. (1998). Multiple-Center-of-Projection Images. *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '98, 19. -24. Juli 1998, Orlando)* (S. 199–206). Gehalten auf der 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '98), New York: ACM Press. <https://doi.org/http://doi.acm.org/10.1145/280814.280871>
- Singh, K. (2002). A Fresh Perspective. *Proceedings of Graphics Interface (GI 2002, Online Papers)* (Band 152, S. 17–24). Calgary, Alberta. Verfügbar unter: <http://www.graphicsinterface.org/proceedings/2002/>
- Spiteris, T. (1966). *Griechische und Etruskische Malerei: Weltgeschichte der Malerei*. (Band 3). Lausanne: Editions Rencontre.
- Steinicke, F., Bruder, G. & Kuhl, S. (2010). Perception of Perspective Distortions of Man-Made Virtual Objects. In C. Grimm (Hrsg.), *Proceeding of the SIGGRAPH '10 Posters (SIGGRAPH '10, 7. - 11. August 2011, Vancouver)* (S. 94). Gehalten auf der SIGGRAPH '10, New York: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1836845.1836946>
- Tomasello, M. (2010). *Origins of human communication* (The Jean Nicod lectures) (1. MIT paperback ed.). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Vallance, S. & Calder, P. (2006). Rendering Multi-Perspective Images with Trilinear Projection. In V. Estivill-Castro (Hrsg.), *Computer Science 2006: Proceedings of the Twenty-Ninth Australasian Computer Science Conference (ACSC 2006, 16. - 19. Januar 2006, Hobart)* (Band 48, S. 227–235). Gehalten auf der Twenty-Ninth Australasian Computer Science Conference (ACSC 2006), Sydney: Australian Computer Society. Verfügbar unter: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1151699.1151725>
- Vinayagamoorthy, V., Steed, A. & Slater, M. (2008). The Impact of a Character Posture Model on the Communication of Affect in an Immersive Virtual Environment. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 14(5), 965–982. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2008.62>
- da Vinci, L. (1925). *Leonardo da Vinci: Traktat von der Malerei*. (M. Herzfeld, Hrsg., H. Ludwig, Übers.). Jena: Eugen Dietrichs.
- Vitruvius. (1964). *Zehn Bücher über Architektur: Lateinisch und Deutsch*. (C. Fensterbusch, Hrsg.). Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft (WBG).
- Ware, W. R. (1900). *Modern Perspective a Treatise upon the Principles and Practice of Plane and Cylindrical Perspective*. New York, London: The Macmillan Company. Verfügbar unter: [http://openlibrary.org/books/OL14365381M/Modern\\_perspective](http://openlibrary.org/books/OL14365381M/Modern_perspective)



- Watt, A. (1993). *3D Computer Graphics*. (2.). Wokingham, Suffolk [u. a.]: Addison-Wesley.
- Wojdziak, J., Kammer, D., Franke, I. S. & Groh, R. (2011). BiLL: An Experimental Environment for Visual Analytics. *Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems (EICS '11, 13. - 16. Juni 2011, Pisa)* (S. 259). Gehalten auf der 3rd ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems (EICS '11), New York: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1996461.1996533>
- Wojdziak, J., Zavesky, M., Kusch, K., Wuttig, D., Franke, I. S. & Groh, R. (2011). Figure Out Perspectives: Perceptually Realistic Avatar Visualization. *Proceedings of the Eighth International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition and Applications and Proceedings of the Twelfth International Conference on Computer Graphics and Imaging (IASTED2011, 16. - 18. Februar 2011, Innsbruck)* (S. 314). Gehalten auf der Conference on Signal Processing, Pattern Recognition and Applications and Conference on Computer Graphics and Imaging (IASTED2011), Anaheim: ACTAPRESS. <https://doi.org/10.2316/P.2011.722-006>
- Yankova, A. & Franke, I. (2008a). Angle of View vs. Perspective Distortion: A Psychological Evaluation of Perspective Projection for Achieving Perceptual Realism in Computer Graphics. *Proceedings of Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV'08, 9. - 10. August 2008, Los Angeles)* (S. 204–204). Gehalten auf der Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV'08), New York: ACM Press.
- Yankova, A. & Franke, I. (2008b). Angle of View vs. Perspective Distortion : A psychological evaluation of perspective projection for achieving perceptual realism in computer graphics. *Perspective*, 1(212), 59593–59593. <https://doi.org/10.1145/1394281.1394330>
- Yu, J. & Mcmillan, L. (2004). A Framework for Multiperspective Rendering. *Proceedings of 15th Eurographics Symposium on Rendering (EGSR'04, 21. - 23. Juni 2004, Norrköping)* (Band 15, S. 61–68). Gehalten auf der 15th Eurographics Symposium on Rendering (EGSR'04), Sweden: The Eurographics Association for Computer Graphics.
- Yu, J., McMillan, L. & Sturm, P. (2008). Multiperspective Modeling, Rendering, and Imaging (SIGGRAPH Asia '08). *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Courses* (S. 14:1–14:36). New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/1508044.1508094>
- Zavesky, M. (2006). *Die erweiterte perspektivische Korrektur - Ein geometrisches Verfahren zur dialogorientierten computergrafischen Abbildung dreidimensionaler Szenen*. Dresden: Professur Mediengestaltung, Institut für Software- und Multimediatechnik, Fakultät Informatik, Technische Universität Dresden (Große Belegarbeit).
- Zavesky, M., Wojdziak, J., Kusch, K., Wuttig, D., Franke, I. S. & Groh, R. (2011). An Individual Perspective - Perceptually Realistic Depiction Of Human Figures. In L. Mestetskiy (Hrsg.), *Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications 2011 (VISAPP'11, 5. - 7. März 2011, Vilamoura)* (S. 313–319). Gehalten auf der International Conference on Computer

Vision Theory and Applications (VISAPP'11), Vilamoura: SciTePress - Science and Technology Publications.

Zelnik-Manor, L., Peters, G. & Perona, P. (2005). Squaring the circle in panoramas. *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1* (S. 1292-1299 Vol. 2). Gehalten auf der Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1, Beijing, China: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2005.231>

Zorin, D. & Barr, A. H. (1995). Correction of Geometric Perceptual Distortions in Pictures. *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '95, 6. -11. August 1995, Los Angeles)* (S. 257–264). Gehalten auf der 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '95), New York: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/218380.218449>

## Kontakt

Dr.-Ing. Ingmar S. Franke (Korrespondenz)  
GTV – Gesellschaft für Technische Visualistik mbH, Dresden  
Würzburger Str. 58  
01187 Dresden  
[ingmar.franke@visualistik.de](mailto:ingmar.franke@visualistik.de)

Dipl.-Ing. Mario Linke  
I/ED-4, Design Management & Design Strategie, Designzentrum, Audi AG  
85045 Ingolstadt  
[mario.linke@audi.de](mailto:mario.linke@audi.de)

Dr.-Ing. Christian Bendicks  
TVG - Technische Visualistik GmbH, Magdeburg  
Gerhart-Hauptmann-Str. 21  
39108 Magdeburg  
[christian.bendicks@visualistik.eu](mailto:christian.bendicks@visualistik.eu)

Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Groh  
Technische Universität Dresden, Fakultät Informatik, Institut Software- und  
Multimediatechnik, Professur Mediengestaltung,  
01062 Dresden  
[rainer.groh@tu-dresden.de](mailto:rainer.groh@tu-dresden.de)

# Card Sorting basierter Ansatz zur Erarbeitung einer nutzungsgerechten Methodensammlung am Beispiel des IDE-Toolkits

Martin Wiesner, Björn Kokoschko, Linh Bùi Duy und Laura Augustin

## 1. Motivation

Es gibt umfassende Beschreibungen von Methoden und Werkzeugen zur Produktentwicklung und dem Industriedesign in unterschiedlichen Methodensammlungen (Bavendiek et al. 2014; Freisleben, 2001; IDEO.org, op. 2015; LUMA Institute, 2012; Pahl, et al. 2007; Strasser et al. 2014; Vezzoli et al. 2014). In Methodenkatalogen werden diese typischerweise nach Phasen in der Produktentwicklung oder entsprechend von Expertenwissen kategorisiert. Die meisten Produktentwicklungsprozesse zeichnen sich durch eine hohe Anzahl an Iterationen aus, welche sich jedoch mit vielen verbreiteten Prozessmodellen nicht ausreichend abbilden und planen lassen (Lohmeyer, 2013). Daher ist es notwendig, ProduktentwicklerInnen situationsspezifisch mit passenden Methoden zu unterstützen (Albers et al., 2014; Albers et al. 2015). Es stellt sich somit die Frage, wie man aus Prozesssicht und insbesondere auch aus Usability-Sicht, die große Vielfalt an Methoden der Produktentwicklung strukturieren kann. Da bisherige Anordnungen hinterfragt werden sollen, gilt es zu ermitteln, mit welchen alternativen methodischen Mitteln Methoden angeordnet werden können.

Dieser Beitrag beschreibt ganz konkret anhand des IDE-Toolkits die Aufstellung und Strukturierung eines solchen Toolkits und dessen Anwendung und Integration innerhalb der Produktentwicklung. Zudem soll dieser Beitrag weiteren Organisationen, Unternehmen, Designagenturen, Forschergruppen etc. eine Vorgehensweise aufzeigen, um Methodensammlungen und deren

jeweilige Struktur aufzustellen. Dieser Beitrag beschreibt somit eine übertragbare Vorgehensweise, um eine nutzungsbasierte Kategorisierung von Methoden und Werkzeugen in der Produktentwicklung durchzuführen.

## 2. Stand der Forschung

In einer Recherche zu Methodensammlungen, deren Strukturierung inhaltsbasiert statt phasenbasiert sind und die darüber hinaus situationsspezifisch unterstützen können, wurden verschiedene Ansätze gefunden. So ist das Münchener Vorgehensmodell von Lindemann zu nennen (Lindemann, 2009). Lindemann zeigt einzelne Aufgabenfelder, welche innerhalb einer Entwicklung individuell miteinander verknüpft werden können (Neutschel, 2017). Insbesondere die methodenspezifischen Erweiterungen von Braun und Ponn zeigen wie dieses Modell praxisorientiert und kontextbasiert verwendet werden kann (Braun, 2005, Ponn, 2007). Daneben ist das erstmals 2002 veröffentlichte SPALTEN-Modell nach Albers et al. (2002) zu nennen, das stets weiterentwickelt wurde und das durch eine spätere Erweiterung durch eine Applikation (Albers et al., 2015), situationsbasiert auf Basis einer Vielzahl von Eigenschaften Vorschläge zu einzelnen Methoden unterbreiten kann. Aus dem eigenen Forschungskontext heraus, welcher stark interdisziplinär orientiert ist, sind die Handlungsfelder des IDE-Vorgehensmodell nach Vajna (2014) zu nennen, sowie dessen Erweiterung durch Neutschel (2017) hier wird insbesondere auf weitere Disziplinen, wie das Industriedesign und die Businessplangestaltung eingegangen. In Tabelle 1 sind die Vorgehensmodelle und deren jeweilige Handlungsfelder aufgezeigt. Allen diesen drei Modellen scheint gemein zu sein, dass deren Handlungsfelder auf Basis von Expertenwissen festgelegt wurden und Methode. In der Literatur existieren viele Möglichkeiten zur Ordnung von Methoden, von denen in den vorliegenden Beispielen nur ein Bruchteil abgedeckt wird. Braun gibt eine Übersicht über die Vielfalt der Methodenordnungen bzw. zugehöriger Ordnungskriterien (Braun, 2005, Ponn, 2007). Er stellt weiterhin fest, dass für Methodenordnungen eine Vielzahl an Bezeichnungen gewählt wird: Einteilungen, Gruppierungen, Gliederungen, Klassifizierungen, Systematisierungen, Typologien, Synopsen, Taxonomien etc. In jedem dieser Modelle steckt viel explizites theoretisches Fachwissen und jahrelange Weiterentwicklung. Inwieweit diese deduktiven Strukturierungen (also Zuordnungen auf Basis basierender The-

oriekonzepte (Mayring, 2010)) jedoch die anwendungsspezifische Wirklichkeit der AnwenderInnen abdeckt und inwieweit diese schnell und intuitiv angewendet werden können, soll Ansatzpunkt für eine hier durchgeführte Unterteilung von Handlungsfeldern als Strukturierungsebene für eine induktive Methodensammlung sein, die sich also nicht auf Basis bestehender Theoriekonzepte ergeben soll.

Münchener Vorgehensmodell (Lindemann 2009)	SPALTEN-Vorgehensmodell (Albers, Saak, Burkardt 2002)	IDE-Vorgehensmodell (Vajna, S., 2014)]
Ziel planen	Situationsanalyse	Recherchieren
Ziel analysieren	Problemeingrenzung	Entwickeln und Auslegen
Ziel strukturieren	Generierung alternativer Lösungen	Bewerten, Vergleichen, Auswählen
Lösungsalternativen suchen	Lösungsauswahl	Gestalten, Modellieren
Eigenschaften ermitteln	Tragweitenanalyse	Komplettieren
Entscheidungen herbeiführen	Entscheiden und Umsetzen	
Ziel absichern	Nacharbeiten und Lernen	

Tabelle 1: Übersicht Vorgehensmodelle

Die Strukturierung eines Methodenkits kann als die Erstellung einer Informationsarchitektur verstanden werden. In einer Diskussion darüber "Wer für die Umsetzung von Informationsarchitekturen qualifiziert ist." schlagen Morville und Rosenfeld (Rosenfeld, 2002) vor, dass ein breites Spektrum von Disziplinen gemeinsam Einblick in diese sich entwickelnde Wissenschaft geben kann (Hannah, 2005). Dies steht im Gegensatz zu den auf Basis von Expertenwissen aufgestellten Methodenkategorien. Um eine breite Einbindung von Disziplinen und von vielen Nutzern und Stakeholdern zu realisieren stellt sich die Methode des Card Sortings als ein geeigneter Ansatz dar (Rosenfeld, 2002).

### 3. Forschungsfragen

Aus der Motivation und dem Stand der Forschung leiten sich folgende Forschungsfragen ab. Zunächst gilt zu beantworten, inwiefern Card Sorting ein

geeigneter Ansatz ist, um Methoden in verschiedene Cluster zu kategorisieren. Weiterhin gilt es zu beantworten, inwiefern sich eine durch Card Sorting ergebende Struktur von phasenorientierten Strukturierungen abgrenzt und welche inhaltsthematischen Kategorien gebildet werden.

#### **4. Vorgehensweise**

Um per Card Sorting eine Kategorisierung finden zu können, werden zunächst die Inhaltselemente gesammelt. Im konkreten Fall werden zunächst Methodenvorschläge für die Produktentwicklung durch ein interdisziplinär zusammengesetztes Team aus erfahrenen Masterstudierenden, DozentInnen und wissenschaftlichen MitarbeiterInnen per freier Umfrage erfasst. Ergänzt wird die so entstandene Sammlung an Methoden durch den bereits vorhandenen Methodenbaukasten (Neutschel, Wiesner, Schabacker & Vajna, 2016). Anschließend werden Dopplungen und Synonyme in einem Diskurs getilgt und sich auf die Verwendung von einem Begriff pro Methode geeinigt. Ziel ist es hier, alle potentiellen AnwenderInnen in die Erzeugung einer Informationsarchitektur einzubinden und alle bekannten und verwendeten Methoden aufzulisten.

Um eine nutzerbasierte Struktur zu erhalten, wird der Ansatz des offenen Card Sortings verwendet, hierdurch sollen die individuellen mentalen Modelle innerhalb des Anwenderteams berücksichtigt werden, also welche Methodenvorschläge sie anhand ihrer individuellen erfahrungsbasierten Repräsentationen im Gehirn zusammen gruppieren würden (Spencer, 2009). Anhand des offenen Card Sortings werden einzelne Inhaltselemente bzw. Methodenvorschläge einer Oberkategorie zugeordnet, ohne dass diese Kategorien vorgegeben sind. Das heißt, dass die BearbeiterInnen selbständig für sie passende Oberkategorien bilden. Nur eine festgelegte Kategorie „Unbekannt“ wird benötigt, um erfassen zu können, welche Methoden den AnwenderInnen gänzlich unbekannt sind.

Auf Basis des Card Sortings wird ersichtlich, welche Methoden als zusammengehörig empfunden werden. Die Gruppierung der Methoden erfolgt dabei anhand der Ähnlichkeit der Zuordnungen. Hierzu wird die Visualisierung des Dendrogramms herangezogen und anhand der Verästelung eine zweigliedrige Kategorisierung von Strukturierungsebenen gleicher Ähnlichkeits-

werte vorgenommen (Abbildung 1). Ein Dendrogramm kann dabei als Baumstruktur einer hierarchischen Gruppierung verstanden werden. Es werden hierzu zwei Strukturierungsebenen gewählt: Zunächst auf niedriger Ähnlichkeitsebene, umso übersichtliche sechs Haupthandlungsfelder zu erhalten und dann in einer feineren Unterteilung in höherer Ähnlichkeitsebene, um eine feinere Unterscheidung darstellen zu können. In einem weiteren Diskussionsschritt werden Definitionen zu den Kategorien geklärt, um dadurch ggf. auftretende Doppelzuweisungen zu den Kategorien zu vermeiden. Anschließend wird an dem Dendrogramm ein geschlossenes Card Sorting durchgeführt und die Methoden final den Kategorien zugewiesen. Die anschließend notwendige Benennung der Kategorien in beiden Strukturierungsebenen orientiert sich an den von den AnwenderInnen vorgeschlagenen Kategoriennamen, sowie an den im Abschnitt Stand der Forschung dargestellten Handlungsfeldern verschiedener Vorgehensmodelle (Neutschel et al. 2016; Vajna 2014, Albers et al., 2002; Lindemann, 2009). Die entstandene Kategorisierung ist handlungsbasiert und phasenunabhängig, da die implizierten Methoden zu nahezu jedem Zeitpunkt der Produktentwicklung relevant sein können.

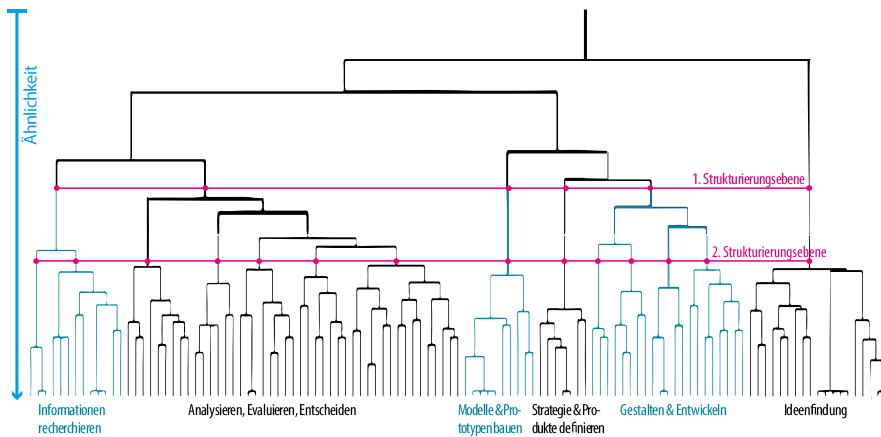


Abbildung 1: Dendrogramm der Methoden und Tools

## 5. Umsetzung im DIE-Toolkit

Das zu implementierende Toolkit umfasst eine strukturiert aufbereitete Sammlung an Methoden und Werkzeugen, aus denen die AnwenderInnen projektspezifisch die passenden auswählen können, um ein Produktentwicklungsprojekt erfolgreich zu bestreiten. Das Toolkit findet zunächst in studentischen Produktentwicklungsprojekten Einsatz und wird unter Betrachtung der Rückmeldungen fortlaufend überarbeitet und erweitert. Bisweilen wird es als Sammlung von Methoden auf einem Methodenfächer (siehe Abbildung 2), den Nutzern in gedruckter Version zur Verfügung gestellt, in dem sie sich anhand der zwei Strukturierungsebenen orientieren können. Über einen QR-Code auf der Rückseite einer jeden Kategorie gelangen die NutzerInnen direkt zur Webversion mit ergänzenden Informationen. Auf dieser wird ein Filter für die gesuchte Kategorie verwendet und somit lediglich die Methoden der aktuellen Kategorie aufgelistet. Dies soll den direkten Zugriff auf ausgewählte Methoden ermöglichen und damit einen nötigen Handlungsschritt einsparen. Wichtige Orientierung bei der Auswahl der Methoden im Web-Interface stellt der abgeschätzte zeitliche Ressourcenaufwand dar. Dieser Aufwand wurde auf Basis einer weiteren Umfrage unter Experten ermittelt. In der Methodenübersicht wird zudem visuell über Icons und auch textlich der inhaltliche Bereich sowie die jeweilige Zielstellung vermittelt. Dem folgend können der oder die NutzerInnen die passende Methode wählen und den kompakten Inhalt auf der Seite lesen und sofort anwenden.

In der Beschreibung einer Methode wird mit der stets gleichen Beschreibungsreihenfolge von; „Ziel“, „Voraussetzungen“, „Erklärung“, „Vorgehen“, „Grenzen und Alternativen“ sowie der „weiterführenden Literatur“, dem AnwenderInnen eine wiedererkennbare und vergleichbare Struktur an die Hand gegeben, um die für ihn relevanten Informationen schnell erfassen zu können. Im Abschnitt „Ziel“ wird definiert, wofür die Methode verwendbar ist. Im folgenden Abschnitt werden die „Voraussetzungen“ zum jeweiligen Einsatz geklärt. Ist die Methode weiterhin für den Einsatz zur aktuellen Aufgabe von Interesse und die Voraussetzungen gegeben, können in der „Erklärung“ die Rahmenbedingungen für die Methode gefunden werden und nähere Informationen erfasst werden. Wird die Methode demzufolge als passend für die aktuell zu lösende Aufgabe identifiziert, kann im Abschnitt „Vorgehen“ eine Anleitung zur Durchführung gefunden werden.





Abbildung 2: Entstandenes Toolkit als Kartenfächer und Webversion

Stößt die Methode im Verlauf des Projektes an ihre Grenzen oder ist ggf. im Vorhinein mit anderen Methoden zu ergänzen, wird den AnwenderInnen im Abschnitt „Grenzen und Alternativen“ über Alternativen als auch über zu bedenkende Aspekte informiert. Sind die kompaktgehaltenen Informationen für den Lesenden nicht ausreichend, kann dieser sich über „weiterführende Literatur“ im gleichbenannten Abschnitt vertieft einlesen.

Gibt es Anregungen bezüglich neuer Methoden und deren Verwendung durch neue Anwendende im Prozess oder die Notwendigkeit sich einer Alternative zu bedienen, kann diese, wenn sie Wiederverwendung findet oder sich zur Erweiterung von Prozessen dienlich zeigt, in das Toolkit aufgenommen werden. So finden Methoden aus unterschiedlichen Bereichen Einzug und formen damit auch den IDE-spezifischen Prozess.

## 6. Integration in ein kontextsensitives Vorgehensmodell

Ziel des Integrated Design Engineerings ist es ein breites Spektrum an Produkten mithilfe eines Vorgehensmodells entwickeln zu können. Hierzu sollte

nur so viel Prozessablauf wie nötig vorgegeben werden, um dabei so wenig wie möglich einzuschränken und damit ein möglichst breites Spektrum an Lösungsmöglichkeiten aufzeigen zu können. Das Toolkit liefert einen Methoden- und Werkzeugbaukasten, aus dem für jedes Projekt kontextsensitiv eine sinnvolle Kombination zusammengestellt werden kann (Neutschel et al., 2016). Basisvorgabe sind einige wenige Kernarbeitspakete die sich aus langjähriger Projekterfahrung heraus ergeben haben und die nahezu projektunabhängig zum Einsatz kommen können (Neutschel, 2017). Diese Kernarbeitspakete können als Container oder auch Prozessbausteine innerhalb einer Prozessplanung verstanden werden, welche durch konkrete Methoden- anwendungen innerhalb des Produktentwicklungsprozesses erfüllt werden sollen (Neutschel, 2017; Ponn, 2007). Einige der elementaren Kernarbeitspakete sind in Abbildung 3 stark vereinfacht dargestellt. Zur allgemeinen Orientierung insbesondere für Studierende wird hierbei eine Produktentwicklung in je vier Entwicklungsphasen (Initialisierung, Konzeptionierung, Detaillierung, Realisierung) eingeteilt. Wesentliche Kernarbeitspakete bzw. Prozessbausteine können diesen modellhaft zugeordnet werden (Neutschel, 2017).

Die Übersicht in Abbildung 3 wird den Studierenden in Praxisprojekten an die Hand gegeben, um den Ablauf der studentischen Projekte zu kommunizieren und um die essentiellen Kernarbeitspakete zu nennen, welche dann innerhalb der Teams über geeignete Methodenauswahl zu erfüllen sind. Ergänzend zum bisherigen Stand des kontextsensitiven Vorgehensmodells (Neutschel et al., 2016) ist nun die Verbindung zum ausgearbeiteten Toolkit und die Neuordnung der Methoden in nutzungsorientierte Cluster. Um eine Verbindung zum Toolkit zu schlagen, erfolgt eine visuelle Referenzierung über die Icons der Methoden-Cluster. Denkbar wäre auch ein interaktives System, welches beim Klicken des jeweiligen Prozessbausteins online Methodenvorschläge unterbreitet. Interessant ist, dass sich das angewandte Card Sorting die Methoden im Detail neu gruppieren, weiterhin haben sich durch die kollektive Sammlung an Methoden viele neue interessante Methodenvarianten aufgezeigt. Im Vergleich zu den Tätigkeitsfeldern von Vajna (2014) ist beispielsweise klar zu sehen, dass insbesondere die Ideenfindung nun ein eigenes Tätigkeitsfeld innehat und das bisherige Tätigkeitsfeld Komplettieren in einzelne Handlungsfelder aufgetrennt wird (u. a. dem Prototypenbau)

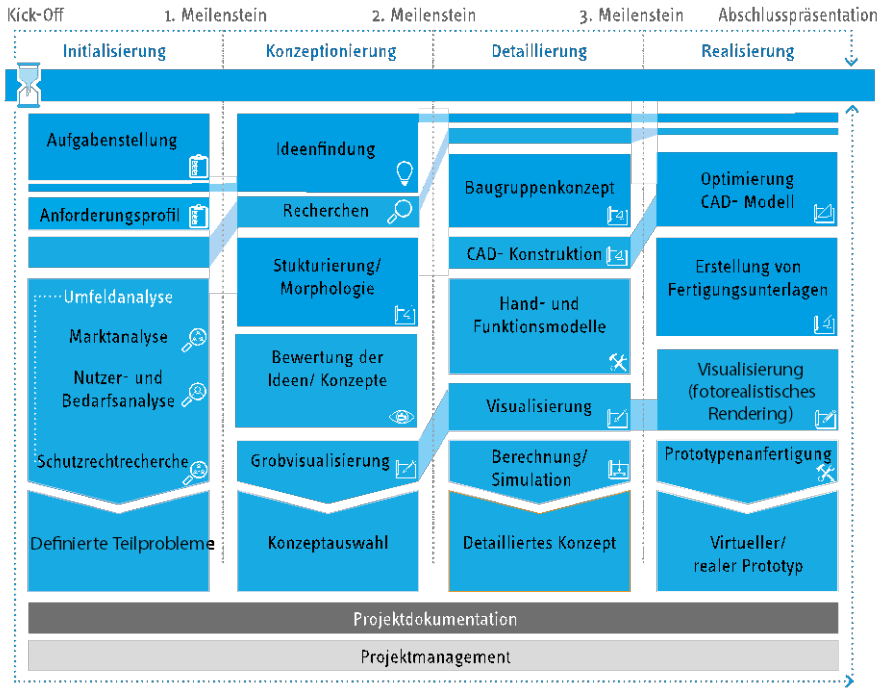


Abbildung 3: Stark vereinfachtes IDE-Vorgehensmodells für studentische Entwicklungsprojekte und deren elementare Kernarbeitspakete (Prozessbausteine)

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Es zeigte sich, dass die befragten Personen die Methoden und Werkzeuge in inhaltsthematische Kategorien unterteilten, anstatt eine Gruppierung nach Phasen vorzunehmen. Diese inhaltsthematischen Kategorien helfen entsprechend der mentalen Modelle der AnwenderInnen effizient die richtige Methode zu finden. Falls eine Planung anhand der Phasen erfolgen soll, bildet die Darstellung der Kernarbeitspakete in Verknüpfung mit den inhaltsthematischen Kategorien eine sinnvolle Kombination. Neben dem erkannten Mehrwert innerhalb des speziellen Anwendungsgebiets der studentischen Entwicklungsprojekte lässt sich festhalten, dass Card Sorting eine geeignete Vorgehensweise ist, um Methodensammlungen innerhalb von Unternehmen oder anderen Organisationen zu erstellen und spezifisch den Ansprüchen

der AnwenderInnen zu strukturieren anzupassen und zu erweitern. Insbesondere scheint das offene Card Sorting geeignete wenn es darum geht induktiv ganz neue Strukturierung zu erstellen.

Es besteht die Möglichkeit im konkreten Fall die Kategorisierungen noch weiter zu konkretisieren oder zu erweitern. Insbesondere könnten noch mehr Teilnehmer aus der Industrie eingebunden werden. Das onlinebasierte Card Sorting kann beispielsweise mit weiteren Experten geteilt werden, um die Kategorien zu festigen oder in Frage zu stellen. Bei der Auswertung und Diskussion ist deutlich geworden, dass es eine kompromisslose Kategorisierung in einigen Fällen aufgrund unterschiedlicher Meinungen der Experten schwierig ist. Es gilt daher zu prüfen, ob eine flexible Kategorisierung möglich ist, die sich je nach den unterschiedlichen Verständnissen der AnwenderInnen anpassen kann. Das Ziel einer solchen Kategorisierung ist es, dass AnwenderInnen eine Sammlung von Methoden und Werkzeugen für ihre Arbeit nutzen können, ohne dass sich jene an einer vorherdefinierten Kategorisierung und Denkweise ausrichten müssen. Hierzu müssen in folgenden Arbeiten zuerst die unterschiedlichen Sichtweisen der AnwenderInnen erfasst und verstanden werden. Mithilfe des IDE-Toolkits wird ein erster Vorschlag zu einer möglichen Methodensammlung gemacht, und insbesondere ein Ansatz vorgeschlagen mit der Methodenkits für einzelne Teilgruppen erstellt werden können, oder auch um bestehende Toolkits um die Sichtweise von AnwenderInnen in der Praxis zu erweitern.

## **Literaturverzeichnis**

- Albers, A., Reiß, N., Bursac, N., Walter, B. & Gladysz, B. (2015). InnoFox Situationsspezifische Methodenempfehlung im Produktentstehungsprozess. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, CD-Rom.
- Albers, A., Saak, M. & Burkardt, N. (2002). Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-methode. 47. internationales wissenschaftliches Kolloquium.
- Albers, Walter, B., Gladysz, B., Reiss, N., Dörr, M. & Hinkelmann, M. (2014). Ansatz zur situationsund bedarfsgerechten Methodenauswahl in der Produktentwicklung basierend auf dem Systemtripel aus Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem. Tagungsband 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014: Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess, 2014.

- Bavendiek A. K., Inkermann D. und Vietor, T.. (2014). Konzept zur Methodenbeschreibung und auswahl auf Basis von Kompetenzen und Zusammensetzung von Entwicklungsteams.
- Braun, T. E. (2005). Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld (Produktentwicklung, 1. Aufl.). München: Verl. Dr. Hut.
- Freisleben, D. (2001). Gestaltung und Optimierung von Produktentwicklungsprozessen mit einem wissensbasierten Vorgehensmodell (Integrierte Produktentwicklung, Bd. 2). Zugl.: Magdeburg, Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2001. Magdeburg: Univ.
- Hannah, S. (2005). Sorting Out Card Sorting: Comparing Methods for Information Architects, Usability Specialists, and Other Practitioners. CAPSTONE REPORT. Oregon. Zugriff am 07.03.2019. Verfügbar unter <https://core.ac.uk/download/pdf/36682881.pdf>
- IDEO.org. (op. 2015). The field guide to human-centered design. Design kit (1st ed.) [San Francisco]: IDEO.
- Lindemann, U. (2009). Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden (VDI-Buch, 3., korrigierte Aufl.). Berlin: Springer.
- Lohmeyer, Q. (2013). Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- LUMA Institute. (2012). Innovating for people. Handbook of human-centered design methods (First edition). Pittsburgh, PA: LUMA Institute.
- Mayring, P. (2010). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken (Beltz Pädagogik, 11., aktual. u. überarb. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- Neutschel, B. (2017). Parallelisierung von Produktentwicklung und Businessplangestaltung. Ein Beitrag zur Schaffung von regionalem Wachstum durch universitären Wissenstransfer (Produktentwicklung, 1. Auflage). Aachen: Shaker.
- Neutschel, B., Wiesner, M., Schabacker, M. & Vajna, S. (2016). Vorgehensweisen zum Einsatz universitärer Produktentwicklung als Innovationstreiber. In J. Krzywinski, M. Linke & C. Wölfel (Hrsg.), Entwerfen Entwickeln Erleben 2016. Beiträge zum Industrial Design : Dresden 31. Juni-1. Juli 2016 (Technisches Design, Bd. 10). Dresden: TUDpress.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2007). Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung (7. Aufl.). Berlin: Springer. Verfügbar unter [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34061-](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34061-4)
- 4
- Ponn, J. (2007). Situative Unterstützung der methodischen Konzeptentwicklung technischer Produkte (Produktentwicklung, 1. Aufl.). München: Hut.
- Rosenfeld, L. (2002). Information architecture for the world wide web. [Place of publication not identified]: O'Reilly Media.

- Spencer, D. (2009). Card sorting. Designing usable categories. Brooklyn, N.Y.: Rosenfeld Media.
- Strasser, C. Einsatz von Methoden in der Produktentwicklung Ein Beitrag zur praxisgerechten Auswahl und Anwendung.
- Vajna, S. (Hrsg.). (2014). Integrated Design Engineering. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg.
- Van Boeijen, A., Daalhuizen, J., Zijlstra, J. & van der Schoor, R. (Eds.). (2014). Delft design guide. Design methods (Revised 2nd edition). Amsterdam: BIS Publishers.
- Vezzoli, C., Kohtala, C. & Srinivasan, A. (2014). Product-service system design for sustainability. Sheffield: Greenleaf Publishing.

## **Kontakt**

Martin Wiesner, M.A.  
Björn Kokoschko, M.A.  
Linh Bùi Duy, M. Sc.  
Laura Augustin, M. Sc.  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Maschinenkonstruktion  
36106 Magdeburg  
[www.ide.ovgu.de](http://www.ide.ovgu.de)  
[www.lmi.ovgu.de](http://www.lmi.ovgu.de)

# Feasibility-Labor“ – erste Vorstellung neuer Ansätze zur Optimierung der Designumsetzung im Automobilbau

Knut Lender

## Intro

„Die besten Marken in allen Klassen“ - die AutoBild- Leserumfrage 2019 kürt Audi als großen Gesamtsieger. (Quelle: AutoBild 2019 / <http://www.auto-bild.de>)

Sieben ihrer zehn ersten Plätze erreichten die Ingolstädter vier Ringe in der Qualitäts- Wertung. Einen weiteren ersten Platz räumt Audi für das Design ab. „Bei den wichtigsten Kaufkriterien, Qualität, Design und Preis/Leistung, macht Audi nach Meinung unserer Leser derzeit den besten Job“ so AutoBild. Mit diesem Erfolg knüpft die AUDI AG nahtlos an das hervorragende Ergebnis der AutoBild- Leserumfrage des Jahres 2018 an.

Premium- Automobile zu entwickeln, gehört zu den erklärten Unternehmenszielen der AUDI AG. Doch ein herausragendes Design und höchste Qualität in Serie zu bringen – wie funktioniert das eigentlich?

Der Anspruch Premium- Automobile zu entwickeln, bedeutet für die AUDI AG unter anderem, bereits in der Phase der technischen Entwicklung bei Qualität und Design deutliche Schwerpunkte zu setzen. Jedes Fahrzeug der Marke Audi soll für „Vorsprung durch Technik“ stehen. Dieser Vorsprung wird unter anderem durch eine stark auf die Zukunft orientierte Entwicklung und deren konsequente Umsetzung, im Design und der Technik, erreicht. Auch nach fast 50 Jahren ist dieser Werbeslogan ein Unternehmensziel, an dem viele Mitarbeiter täglich arbeiten.

Wie die AutoBild- Leserumfrage des Jahres 2019 einmal mehr gezeigt hat, begeistert das Design der Audi Premium- Automobile viele Menschen und ist

einer der Gründe dafür, dass Audi als Gesamtsieger der „die besten Marken in allen Klassen“- Umfrage hervorging.

Eine Besonderheit des Audi- Designprozesses ist es, dass die Ideen des Designs von einem Design- Feasibilityteam bis in die Serienumsetzung aktiv begleitet werden. Dies ist einer von vielen Erfolgs- Bausteinen, welche eine hohe Design- Qualität an neuen Fahrzeuggeneration garantieren.

In der Umsetzung und Ausarbeitung von Designentwürfen in der Konstruktion sind oft Änderungen am ursprünglichen Design nötig – hier gibt es im Entwicklungsprozess Risiken. Aber gleichzeitig birgt die Auskonstruktion auch Chancen: Wird dieser (nachfolgende) Prozess vom Entwicklungsbereich Design aktiv begleitet, können gemeinsam Lösungen gefunden werden, die ein perfekt abgestimmtes Zusammenspiel von Design und Technik beinhalten.

Dieses Zusammenspiel wird am fertigen Produkt durch den Kunden oft auch direkt als Qualität oder hohe Wertigkeit wahrgenommen.

Der Prozess von einer Designidee bis hin zum fertigen Serienfahrzeug ist sehr komplex. Ganz am Anfang eines jeden Fahrzeugprojektes stehen unzählige Sketches und manuelle Computer- Renderings, welche die Design-Ideen veranschaulichen sollen. Während des weiteren Entwurfsprozesses werden neben den 2D- Sketches auch CAD- Oberflächenmodelle und physische Modelle eingesetzt. Die physischen Modelle sind in dieser Phase aus einem Kunst- Ton gefertigt, der sich leicht modellieren lässt. In diese sogenannten Clay- Modelle werden oft CAD- Entwurfsdaten gefräst und händisch nachmodelliert. Es gibt auch die Möglichkeit, händisch nach Skizzen oder Tapes frei zu modellieren. In beiden Fällen ermöglichen die Clay- Modelle eine Formfindung im Modell, die weder kompliziert, noch sehr zeitintensiv ist. Während dieses Formfindungs- Prozesses werden immer wieder andere Fachabteilungen mit einbezogen, um technische Konzepte und Dimensionierungen zu integrieren.

Im Zuge des sogenannten Designentscheids wird aus mehreren Entwürfen ein Entwurf ausgewählt, welcher in der weiteren Serienentwicklung umgesetzt werden soll. Während bis zum Meilenstein Designentscheid (DE) der Konzept- und Designprozess im Mittelpunkt stand, so ist nun die Strakonstruktion Prozesseigner des folgenden Prozesses der Class-A-Oberflächen-



entwicklung und damit auch der zentrale Punkt der jetzt folgenden Entwicklungsphase. Unter Zusammenarbeit aller technischen Bereiche, wie zum Beispiel der Aerodynamik, der Karosserieentwicklung, der Ergonomie und vieler anderer Fachbereiche, fließen Design und Technik in einem zentralen CAD-Modell immer weiter zusammen.

Die Schnittstelle zum Betrachter eines Fahrzeugs sind alle Sichtoberflächen. Welche hohe Qualität diese Oberflächen haben können, wird an jedem Audi sehr deutlich:



Abbildung 1: Audi A5 / Quelle: Audi- MediaCenter / <https://www.audi-mediacycenter.com>

Die kundenrelevanten Oberflächen von Interieur und Exterieur werden bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung gezielt entwickelt und definiert, da sie als sogenannte Class-A-Oberflächen einen technischen und gleichzeitig auch einen hohen formal-ästhetischen Anspruch aufweisen. Die meisten Sichtoberflächen an einem Fahrzeugexterieur sind hochkomplexe Freiformgeometrien.

Während des Strakprozesses werden schrittweise alle genannten technischen Randbedingungen, aber auch z.B. gesetzliche Vorschriften und ökonomische Aspekte, mit der Designidee vereint. Dabei wird abwechselnd in einem sich wiederholenden Schleifenprozess mit virtuellen und physischen Modellen gearbeitet.

Mit dem physischen Datenkontrollmodell (DKM) endet der Strakprozess und alle kundenrelevanten Sichtoberflächen sind nun funktional und ästhetisch definiert. Das DKM wird in den entsprechenden Gremien bestätigt und in Bezug auf seine Oberflächen final abgenommen. Alle sichtbaren Oberflächen sind nun fortan für die gesamte Weiterentwicklung bis zum Endprodukt festgelegt.

Während der Zusammenführung der Designidee mit allen technischen Bedingungen verändert sich das designte Modell geometrisch. Die ursprüngliche Designidee in der Serienumsetzung trotzdem möglichst unverfälscht zu transportieren, ist Aufgabe des Feasibility-Designers. Eine weitere Aufgabe ist es, formale Fehler auszuschließen. Die Premium- Designqualität eines Audis beinhaltet immer perfekte Fahrzeugoberflächen. Das Team des Feasibility-Designs ist auf diese Design-Serienumsetzung spezialisiert. (Credo: „Design in Serie bringen“)

Mitarbeiter dieses Bereiches sind oft „Quereinsteiger“, die mit Berufserfahrungen aus der Strak- Entwicklung, dem Werkzeugbau oder aus dem Modellbau in diesen Bereich kommen. Durch langjährige Praxis haben sie ein gutes Auge für kleinste Fehler und ein formalästhetisches Designempfinden. Damit finden sie nicht nur Flächen- und Formfehler, sondern sind auch in der Lage, konkrete Lösungen zu den gefundenen Problemen zu erarbeiten.

Die Arbeitsprozesse dieser Phase der Designentwicklung beinhalten heute viele digitale Komponenten, aber um größtmögliche Sicherheit über das tatsächliche Erscheinungsbild eines neuen Fahrzeugs zu erlangen, greift man – nach wie vor – auf physische Modelle zurück.

Die handwerkliche Erstellung physischer Modelle ist mit hohen Kosten (Material- & Arbeitsaufwand) verbunden und ihr Aufbau benötigt, gerade wenn man an die hochwertigen 1:1- Modelle denkt, oft viel Zeit. Deswegen gibt es viele Bestrebungen, immer mehr die teuren und in ihrer Erstellung zeitinten-

siven physischen Modelle, durch digitale Modelle zu ersetzen. Die permanente Optimierung der eigenen Arbeitsweisen ist unbedingt nötig, um wirtschaftlich und effizient arbeiten zu können, sie birgt aber auch Probleme: Modelle sind immer Abbildungen der Realität und haben grundsätzlich spezielle Modelleigenschaften - haben einen bestimmten Modellcharakter. So kann die Arbeit mit physischen und digitalen Modellen Vor- und Nachteile in der gestalterischen Arbeit mit sich bringen: Physische Modelle sind zum Beispiel nur an einem Ort verfügbar. Denkt man an internationale Designprojekte, kann dies ein sehr gravierender Nachteil sein. Eine Schwäche des Einsatzes digitaler Modelle im Design kann es sein, dass man sie nicht direkt anfassen kann. Auch kann der Designer bei seiner Arbeit mit einem virtuellen Modell relativ schlecht die tatsächliche Größe seines Gestaltungs- Objektes erfassen. Für den Formgestalter ist es so zum Beispiel sehr schwer, Bombierungen (Wölbungen) von Freiformflächen zu designen und gezielt mit ihnen zu arbeiten, denn diese sind auch von der Objektgröße abhängig.

Will man in der Gestaltung keine Abstriche machen, sollte der Ersatz physischer durch digitale Modelle also nur dann erfolgen, wenn keine Nachteile oder Einschränkungen für den Entwurfsprozess, für die Präsentationen in der Designphase oder auch die Designqualität zu erwarten sind. Auch in der späten Designphase – der Seriendesignumsetzung (oder auch Feasibility-Phase) – gelten die Vor- und Nachteile physischer und virtueller Modelle gleichermaßen.

## Review

Ein im Jahr 2016 vom Audi- Design vorgestelltes Forschungsthema bezieht sich auf die Bewertung und Gestaltung von Class-A-Freiformflächen im Feasibility- Designprozess von Fahrzeugexterieuren in virtuellen und physischen Arbeitsumgebungen.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde ein repräsentativer Querschnitt von Audi-Fahrzeugprojekten des Fahrzeugexterieurs ab dem Jahr 2010 analysiert.

In einer Voruntersuchung standen hier anfangs ausschließlich die offensichtlichen Unterschiede in der Bewertung der Modellstände in virtuellen und physischen Arbeitsumgebungen im Fokus. Dabei konnte auf umfangreiches

Untersuchungsmaterial zurückgegriffen werden. Dieses Material beinhaltete zum einen die Feasibility- Bewertungen der virtuellen Strakstände in einer virtuellen Arbeitsumgebung und zum anderen die Bewertung des jeweils identischen Entwicklungsstandes in Form eines physischen Modells.

In allen Fahrzeugprojekten lag offensichtlich eine Diskrepanz in der Beurteilung identischer Modellstände zwischen der virtuellen und der physischen Arbeitsumgebung vor.

Das digitale Modell konnte im Entwicklungsprozess in Hinblick auf das physische Endprodukt „Fahrzeug“ noch nicht das leisten, was das physische Modell zu leisten vermochte. Das physische Modell kam dem Erscheinungsbild des späteren Fahrzeugs offensichtlich näher und gab deswegen eine größere Sicherheit in der Bewertung einer Neuentwicklung.

Durch immer bessere Software, neue technologische Möglichkeiten, bessere Bildschirmdarstellungen und gänzlich neue VR-Möglichkeiten konnten die Wahrnehmungsunterschiede zwischen physischen und virtuellen Modellen verringert, aber - Prinzip bedingt - nicht gänzlich auflöst werden.

Es stellte sich die Frage, ob es alternative Ansätze aus dem Design heraus gibt, welche diese Diskrepanz kleiner werden lassen, um letztendlich eine größere Sicherheit in der späten Designphase zu erlangen.

Speziell im täglichen Arbeitsprozess der Seriendesignentwicklung brauchte man Lösungen, die tragfähig und praktikabel sind, denn die Untersuchungen zeigten, dass - den jetzigen technologischen Stand vorausgesetzt – möglicherweise rund ein Viertel aller formalen Fehler nicht abgestellt werden könnten, falls der künftige Feasibility-Prozess ohne (teure und zeitaufwendige) physische Modelle auskommen müsste.

Wie könnte man die hohe formale Qualität der Audi- Fahrzeugen ohne oder mit verringerten Einsatz physischer Modelle in der Feasibility- Phase halten?

Ein Ziel der Bearbeitung war es, die Unschärfe in der Bewertung zu verkleinern und damit mehr Sicherheit in dieser Entwicklungsphase zu erlangen.

Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigten auch die schon im Vorfeld vermuteten Aspekte, die in den unterschiedlichen Modelleigenschaften – virtuell vs. physisch - begründet sind. Es konnten diesbezüglich erste Lösungsansätze („formale Referenzlösungen“ / siehe auch eee 2016) aufgezeigt werden.

Es zeigte sich inhaltlich anhand der Arbeitspunkte aber auch, dass diese oft komplexe Ursachen haben und nicht nur in der bereits untersuchten Thematik begründet sind. Oft können die Arbeitspunkte Problemen im Entwicklungsprozess, dem Faktor Mensch (Kommunikation), der Class-A-Thematik und weiteren Aspekten zugeordnet werden.

In mehreren weiterführenden Untersuchungen, die neben der inhaltlichen Erweiterung der Voruntersuchung auch eine Erweiterung auf aktuelle Projekte beinhaltete, konnten entsprechende Problemkreise lokalisiert und zugeordnet werden.

Für eine Weiterbearbeitung aus dem Designbereich heraus erwies sich der Problemkreis, der mit hochkomplexen Freiformen und Class-A-Oberflächen - ihrer Bewertung und ihrer Gestaltung - verbunden ist, als besonders interessant.

## **Vorstellung neuer Ansätze auf der eee 2016**

Im Ausblick des eee-Beitrags des Jahres 2016 „Feasibility Design – Herausforderungen und alternative Modellierkonzepte - Ergebnisdarstellung der Voruntersuchung & Ausblick“ wurde eine gänzlich neue thematische Entwicklungsrichtung angedeutet, welche zum damaligen Zeitpunkt so neu war, dass sie noch keinen konkreten Arbeitstitel hatte.

Zwischenzeitlich sind unter der Überschrift „Feasibility- Labor“ Ansätze und Aktivitäten zusammengefasst worden, die es lohnen, hier vorgestellt zu werden.

Inhaltlich ist dieses „Feasibility- Labor“ in die Serienumsetzung von Designentwicklungen eingebettet und schließt sich an die seinerzeit vorgestellten Inhalte lückenlos an.

Wie schon beschrieben, ist die Bewertung von komplexen Freiformflächen in virtuellen und physischen Arbeitsumgebungen Teil der täglichen Arbeit aller eigenverantwortlich in den Projekten tätigen Feasibility- Designer.

Auch um in diesem Prozess unterschiedliche Erfahrungen der Feasibility- Designer im Hinblick auf die verschiedenen verwendeten Modelltypen ausgleichen zu können, werden die Meilensteinstände der Einzelprojekte im Team bewertet. Dieses Mehraugenprinzip optimiert den Arbeitsprozess und reduziert die Fehlerhäufigkeit in der Bewertung.

Es zeigte sich, dass Feasibility- Designer, die sehr oft den Abgleich zwischen physischen Modellen und virtuellen Arbeitsumgebungen hatten, auch eine größere Sicherheit in der Beurteilung von Design- Geometrien im Wechsel dieser Medien haben. Die Fehler die zwischen der Beurteilung des virtuellen Modells und der Beurteilung des physischen Modells auftreten, sind bei diesen erfahrenen Personen kleiner.

Offensichtlich ist es die Berufserfahrung, welche den Unterschied ausmacht.

Gerade die fachliche Expertise von Kollegen, die zuvor in der Strakerstellung tätig waren und so in der in der virtuellen Welt gearbeitet, das Produkt aber im Arbeitsprozess immer wieder auch physisch erlebt hatten, erwies sich als sehr treffsicher.

Diese Experten auf dem Gebiet von Class-A-Geometrien hatten oft tausendfach den Abgleich gleicher Projektstände virtuell vs. physisch und konnten so neue und unbekannte geometrische Situationen besser einschätzen. Sie sind auch eher fähig, nur anhand virtueller Modelle Lösungen für Freiformoberflächen zu entwickeln.

Wenn es so ist, dass dieser Abgleich also „lernbar“ ist, muss es das Ziel sein, entsprechende Erfahrungen auszubauen.

Hieraus wurde die Idee geboren, immer wiederkehrende Situationen virtuell und physisch erlebbar – greifbar - zu machen.

In Expertenrunden wurden Feasibility- Erfahrungswerte zusammengefasst und Standardsituationen, die immer wieder problemartig im Arbeitsprozess auftreten, extrahiert.

Entsprechende geometrische Situationen wurden gemeinsam ausgearbeitet und zunächst in Skizzenform festgehalten:

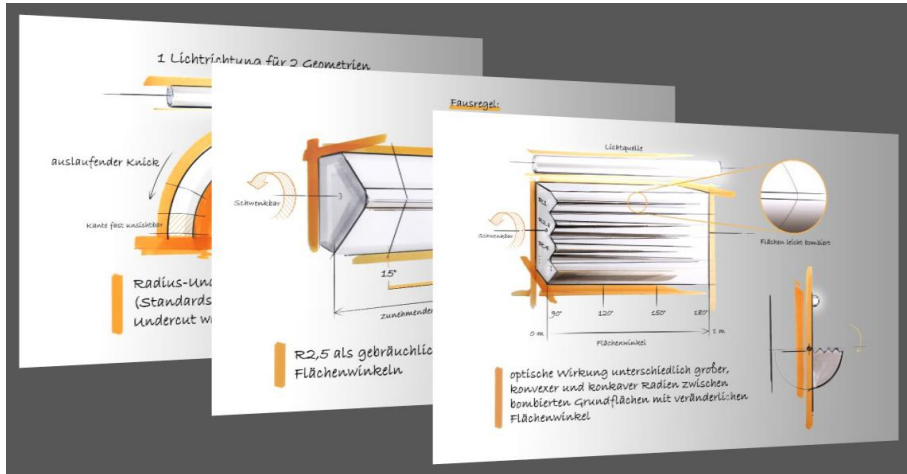


Abbildung 2: Skizzen / Quelle: Audi-Feasibility-Design 2019

Grundidee war zunächst nur, die so gesicherte Berufserfahrung aufzubereiten und für alle Teammitglieder zugänglich zu machen.

Während der Ausarbeitung im Feasibility-Team und in der Diskussion mit anderen Fachbereichen zeigten sich weitere - weitreichende - Vorteile der Bearbeitung dieser Thematik: Es würde beispielsweise möglich sein, spezielle Modelle oder auch Modellschleifen in den Einzelprojekten einzusparen und durch einstellbare physische Modelle formaler Standartsituationen zu ersetzen. Zum Beispiel ist ein Schindelungsmodell für Über- oder Unterstände von Bauteilen angedacht, an dem Schindelungen physisch ausprobiert, festgelegt und auf die konkrete Situation eines Fahrzeugprojektes als CAD-Startwert übertragen werden können.

Des Weiteren sind physische Mustermodele angedacht, die eine Referenz für den Design- Entwurfsprozess in Virtueller Realität bilden können. Das Entwurfs- Design könnte hier aus dem Feasibility-Design heraus in der frühen Phase unterstützt werden.

In Gesprächen wurden Fragen, wie die nachfolgend exemplarisch genannten, (unvollständiger Ausschnitt aus Interviews) aufgeworfen:

- Was bedeutet es für den Entwurfsdesigner (und seinen Entwurf), wenn der Werkzeugbau mit ihm „Vorzugskonturen“ festlegen will? Welchen Einfluss hat das auf das Design?
- Was bedeutet es für den Entwurfsdesigner (und seinen Entwurf), wenn auf der Tornadolinie (Key- Line auf der Fahrzeugseite) zum Beispiel statt eines Radius 4 mm nur ein Radius 8 mm darstellbar ist? Ist das gut oder schlecht? – „Torpediert“ es den Entwurf?
- Was bedeutet es für den Entwurfsdesigner (und seinen Entwurf), wenn der Werkzeugbau an allen großen Blechflächen eine Mindestbombierung (zum Beispiel von einem Radius = 9000 mm) fordert? Was für Bombierungen (Wölbungen) hat das jetzige Design und wie wird das Design nach Einbringen der Forderung aussehen?
- Was ist eigentlich der Unterschied zwischen einer Verrundung mit und ohne Anlauf?
- Wie sieht ein 50% Anlauf-Radius aus? Wie wird dieser am Auto aussehen?
- Was bedeutet es für ein Kunststoffteil, wenn 10% Mindestbombierung gefordert werden, um Einfallstellen am Bauteil zu vermeiden? Wo und wie wird sich das Bauteil verändern?
- Wie wird sich ein Kühlergrill ändern müssen, wenn beispielsweise wegen einer neuen genarbtten Oberfläche statt 3 Grad 7 Grad Entformung nötig werden?
- ....

Entsprechende physische Mustermustermodelle könnten diese Unsicherheiten und Fragen klären. Mit ihnen wäre es möglich, die Diskrepanz zwischen den physischen und den digitalen Modellen besser abzuschätzen und Schleifenprozesse drastisch reduzieren. Eine höhere formale Fehlerfreiheit könnte so auch in den frühen Entwurfsphasen erreicht werden.

## Status

Input und Ideen wurden bislang unter dem Begriff „Feasibility-Labor“ zusammengefasst. Der Begriff „Labor“ wurde gewählt, weil in der Technischen Entwicklung der AUDI AG viele Bereiche als „Labor“ bezeichnet werden, in denen



virtuell entwickelte Komponenten physisch – praktisch – geprüft werden. (z.B. Fahrzeugsitze im „Sitz-Labor“)

Die Vielschichtigkeit der Möglichkeiten des „Feasibility- Labors“ übertrifft den ursprünglichen Gedanken, Berufserfahrung „greifbar“ zu machen, bei weitem. Es erfolgte eine thematische Gliederung in Exterieur- und Interieur- Themen und hier eine weitere Untersetzung in Bereiche wie „Technologie“, „Serienteile“ oder auch „formale Themen“.

Die zunächst als „Lernstationen“ angedachten Modelle sind einer Idee gewichen, thematische „Module“ zu entwickeln, welche wie ein Ausstellungsbereich in unmittelbarer Nähe zu den Arbeitsplätzen des Feasibility- Teams angeordnet sind. Diese „Module“ könnten auf „Modul- Träger“ montiert sein, die eine Erweiterbarkeit und Flexibilität des Labors garantieren.

Erste Visualisierungen zeigen die mögliche Umsetzung des Labors im Designgebäude:



Abbildung 3: Visualisierung Feasibilitylabor / Quelle: Audi-**Feasibility**-Design 2019

Die Ästhetik passt sich dabei dem Design- Gebäude und an die Corporate-Identity von Audi an.

Aus der Fülle an Informationen, Anforderungen und Ideen wurden in Expertenrunden erste Themenfelder für eine konkrete Bearbeitung ausgewählt und als „Labor- Aufbauten“ entwickelt.

Nachfolgend beispielhaft ein erstes physisches Modell zur Bestückung eines Modulträgers:

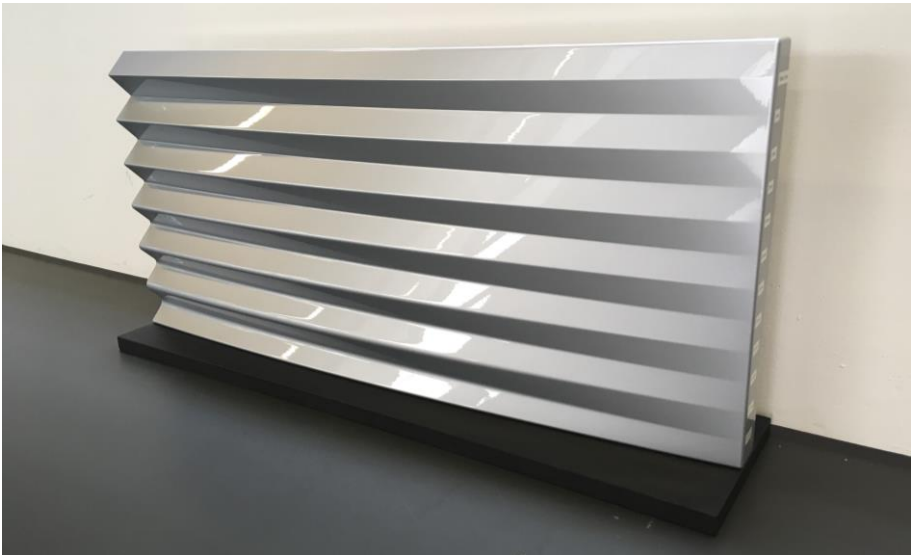


Abbildung 4: Radianmodell / Quelle: Audi-**Feasibility**-Design 2019

## Ausblick

An Inhalten und Umsetzung des „Feasibility- Labors“ wird derzeit intensiv gearbeitet. Es ist ein völlig neues Thema, welches im Rahmen eines Vortrags auf der eee 2019 vom Ansatz und Hintergrund her, seiner geplanten Umsetzung und auch anhand eines konkreten Beispiels exemplarisch vorgestellt werden soll.

## Literaturverzeichnis

- Apitz, Frank. 2016: „Entwicklung formaler Referenzlösungen für den Design-Feasibility-Prozess der Audi AG“. Unterlagen zur Diplomarbeit TU Dresden. Ingolstadt: AUDI AG, 2016
- AUDI AG 2019: Audi MediaCenter, Ingolstadt: AUDI AG, 2019
- AutoBild: Axel Springer Auto Verlag GmbH Hamburg, 2019
- Hirschberger, T. 2019: Das sind Deutschlands beste Automarken. In: Auto Bild, 54-63
- Lender, K. 2015: Vortrag Konzernfeasibilityforum: „Feasibilityarbeit am Beispiel des neuen A8“. Ingolstadt: Audi AG, 2015
- TU Dresden / AUDI AG 2014: INI.TUD-Vertrag zur Wissenschaftskooperation. Ingolstadt: AUDI AG, 2014
- Völkel, Marvin. 2014: „Beurteilung von Class-A-Freiflächen aus gestalterischer Sicht“. Diplomarbeit TU Dresden. Ingolstadt: AUDI AG, 2014

## Kontakt

Dipl.-Ing. Knut Lender  
 AUDI AG  
 D-85045 Ingolstadt  
*knut.lender@audi.de*  
*www.audi.com*



# MBSE-basierte Produktkonfiguratoren zur Analyse der Modularisierung bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme

Florian Seiler, Lea-Nadine Schwede und Dieter Krause

## 1 Einleitung

Der im Zuge der Globalisierung immer stärker anwachsende Wettbewerb im Bereich produzierender Unternehmen führt zu einem kontinuierlichen Wettlauf um stetig kürzer werdende Produktionslaufzeiten. Aufgrund dessen ist eine kontinuierliche Spezialisierung mit produktspezifischen Fertigungssystemen der Akteure am Markt zu verzeichnen, die direkt zu einer erhöhten Nachfrage von Sondermaschinen führt (Krause 2018). Diese geforderte Spezialisierung lässt eine interne Standardisierung für die Hersteller kaum zu und führt zu einer extrem hohen Variantenvielfalt, deren Beherrschung eine der Kernaufgaben bei der Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit darstellt. Insbesondere große Produktstrukturen sind aufgrund der anfallenden Datenmenge und dem resultierenden, hohen Grad an Verknüpfungen schwierig zu verwalten (Blees 2011).

Eine Möglichkeit, die interne Vielfalt bei einer gleichbleibenden externen Vielfalt zu reduzieren und somit den enormen Umfang der Produktarchitektur und deren Folgekosten einzuschränken, bietet die Modularisierung (Krause 2018). Die Entwicklung von modularen Produktstrukturen eröffnet mittels entsprechender Standardisierung die Möglichkeit, durch Modul-, Plattform-, und Baukastenentwicklung den Zielkonflikt zwischen Produktkosten und -vielfalt zu lösen (Ehrlenspiel 2009). Ein solcher Baukasten wird als notwendiges Mittel zur Beherrschung der Vielfalt betrachtet. Aufbauend auf diesen Baukasten kann anschließend ein Configurationssystem aufgebaut werden,

mithilfe dessen schnell und präzise auf unterschiedliche Kundenanforderungen reagiert werden kann.

Bei der Entwicklung und vor allem bei der Pflege eines solchen Baukastens sind jedoch einige Herausforderungen vorhanden. Neben der umfangreichen Datenaufnahme und der verwendungsgerechten Sicherung und Verwaltung derselben insbesondere bei komplizierten Produktarchitekturen, ist die Wahrung der Übersichtlichkeit und der Konsistenz meist nicht mehr zuverlässig zu gewährleisten. Als Konsistenz wird hierbei die vertikale Konsistenz, die Konsistenz zwischen Modellen und die zeitliche Konsistenz verstanden (Hanna et al. 2018). Vor allem bei der Versionierung im Zuge der Produktgenerationsentwicklung ist die Gefahr einer Inkonsistenzentwicklung verstärkt gegeben (Herzig et al. 2014). Hier erscheint eine softwarebasierte Lösung unumgänglich.

Ein Ansatz zur Lösung dieser Problemstellung ist in der Literatur durch die Verwendung von PLM(Product-Lifecycle-Management)-Systemen beschrieben.

Ein entsprechendes PLM-System soll die im Unternehmen existierende Daten- und Softwarestruktur verbinden und als *Single-Source of Truth* (Riesener 2017) fungieren, um die Konsistenz der Modelle zu gewährleisten. Allerdings wird gerade bei der Verwendung von Modellen bei der Schaffung und Verwaltung der Produktarchitektur deutlich, dass ein PLM-System hierzu nicht vollumfänglich dazu in der Lage ist, als einheitlicher Datenstamm zu fungieren. Hierbei ist die Ontologie, die Verwendung „einheitlicher Vokabeln“ (Kaufmann et al. 2014) zwischen den Systemen, um z. B. eine Konsistenzprüfung bei der Konfiguration zu implementieren, eine nicht zu unterschätzende Herausforderung bei der Umsetzung auf Basis eines reinen PLM-Systems. Wie in diesem Beitrag beschrieben wird, lässt sich diese Lücke mithilfe des MBSE (Model-Based Systems Engineering) schließen.

Folgende Abbildung 1 zeigt eine graphische Darstellung des Problem-Lösungsansatz Zusammenhangs.

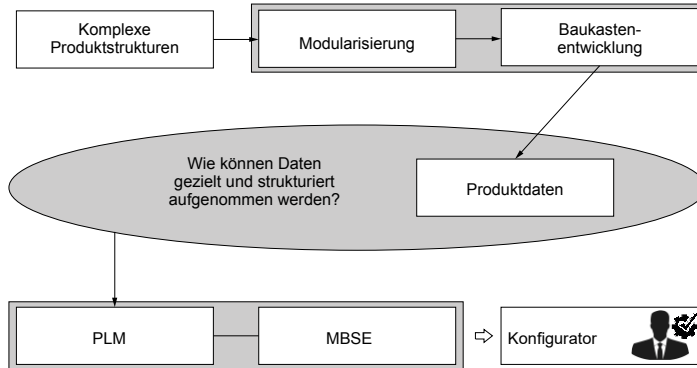


Abbildung 1: Graphische Darstellung der Problemstellung

Dieser Beitrag hat zum Ziel, insbesondere die Möglichkeit einer softwarebasierten Lösung mittels MBSE zur konsistenten Speicherung, Verarbeitung, Nutzung, Veränderung und Analyse der Produktarchitekturdaten aufzuzeigen, um auf dieser Basis ein Produktkonfigurationssystem aufzubauen, welches das Wissen aus der vorangegangenen Modularisierung dem Nutzer intuitiv zugänglich macht. Ebenfalls sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die sich bei der Verwendung eines MBSE basierten Konfigurators hinsichtlich der Analysemöglichkeiten einer modularen Struktur eröffnen.

## 2 Stand der Wissenschaft

In diesem Abschnitt wird der Stand der Wissenschaft zu den Themenbereichen Modularisierung, Baukastenentwicklung, PLM-Systeme, MBSE Engineering und Konfigurationssystemen kurz aufgezeigt.

### 2.1 Modularisierung

Als Modularisierung wird die zielorientierte Entwicklung der Modularität der Produktstruktur beschrieben, wobei die konkrete Festlegung von Modulen und ihren Schnittstellen zueinander im Vordergrund steht. Eine Zerlegung der Produktstruktur in Komponenten (Dekomposition) und der darauffolgenden Analyse unter technisch-funktionalen bzw. produktstrategischen Gesichtspunkten ermöglicht eine Neugruppierung der Komponenten zu Modulen (Krause 2018). Es existieren verschiedene Ansätze zur Entwicklung

modularer Produktstrukturen, wie z.B. ERIXON's MFD (Modular Function Deployment) oder der Integrierte PKT-Ansatz (Erixon 1998, Krause 2018).

Letzterer besteht aus unterschiedlichen Methodenbausteinen, die für die einzelnen Schritte bei der Entwicklung modularer Produktstrukturen verwendet werden. Hierzu zählen die Reduzierung der internen Vielfalt mittels variantengerechter Produktentwicklung sowie die Verringerung varianzinduzierter Komplexität, ohne jedoch die für den Kunden angebotene Produktpalette zu beeinflussen. Darauf aufbauend folgt die Lebensphasenmodularisierung. Dabei ist eine strategisch und produktspezifisch optimale Modulstruktur in allen Produktlebensphasen das Ziel (Krause 2018). Gleichzeitig wird das Ausnutzen von Skaleneffekten sowie die Wiederverwendbarkeit bereits geleisteter Arbeitsaufwendungen ermöglicht, wenn Module beispielsweise kommunal in unterschiedlichen Produktvarianten einer Produktfamilie genutzt werden (Blees 2011). Als Nachteile lassen sich jedoch auch eine eventuell eingeschränkte Produktdifferenzierung sowie eine mögliche Überdimensionierung anführen (Kipp 2012).

## 2.2 Baukastenentwicklung

Modularisierung und die Entwicklung eines Baukastens werden stets als konsequente Schritte betrachtet (Kopenhagen 2004). Es existieren verschiedene Definitionen zu Baukastensystemen (vgl. Lindemann 2011, Pahl und Beitz 2013, Schuh 2015). Die Definition, auf deren Verständnis dieser Beitrag aufbaut, findet sich bei BURSAC, der einen Baukasten wie folgt beschreibt: „Ein Baukasten ist die Menge aller technischen Subsysteme, die dem zugehörigen Baukasten-Regelwerk folgen, mit dem Ziel, aus diesen Subsystemen technische Systeme mit jeweils unterschiedlicher Menge aller Funktionen konfigurieren zu können“ (Bursac 2016).

Es wird deutlich, dass ein Baukasten kein gebrauchsfertiges Produkt darstellt, sondern lediglich sämtliche konfigurierbaren Module umfasst. Hierzu muss ein entsprechendes Regelwerk geschaffen werden, welches schlussendlich durch die Produktarchitektur definiert wird. Als Haupttypen werden hierbei in der Literatur Anwender- und Herstellerbaukästen identifiziert.



## 2.3 Konfigurationssysteme

Aufbauend auf einer modularen Struktur sind Konfigurationssysteme zur Beherrschung der immer umfassenderen, variantenreichen Produktarchitekturen unumgänglich (Plietz 2011). LIEBISCH beschreibt einen Konfigurator als Instrument, konkrete Anforderungen eines Kunden optimal auf eine passende Produktvariante abzubilden. Als generelle Einschränkung gilt jedoch, dass die Konfigurationsmöglichkeiten meist nie die vollständige Menge der Kundenwünsche abdecken können (Liebisch 2014). Da Kunden keine kundenrelevanten Eigenschaften kaufen, sondern sich auf Basis derer für variante Ausprägungen entscheiden, kommt einem Konfigurator generell die Aufgabe zu, alle Informationen zwischen Kundenanforderungen und Stückliste zu verarbeiten, was einer Art „Übersetzung“ entspricht. (Kortmann et al. 2009). Hierbei werden Konfiguratoren in drei Hauptklassen unterteilt: Produktkonfiguratoren, Variantenkonfiguratoren und Angebotskonfiguratoren (Erkus 2009) und setzen sich aus einer Interaktionsplattform sowie einem Datenpflegewerkzeug zusammen (Andreas 2009). Die Interaktionsplattform entspricht hierbei dem Frontend, mittels dessen die in die Datenstruktur eingepflegte Produktarchitektur dem Nutzer zugänglich gemacht wird. Das Datenpflegewerkzeug stellt hierbei die Möglichkeit zur Verwaltung jenes Datensatzes dar, wie es in diesem Beitrag durch die Verwendung eines geeigneten MBSE-Tools beschrieben wird (siehe Abschnitt 3).

## 2.4 Product-Lifecycle-Management (PLM)-Systeme

PLM-Systeme (*Product Lifecycle Management*, seltener *Plant Lifecycle Management*), umschreiben die ganzheitliche Gestaltung und Verwaltung des Lebens eines Produkts, wobei alle Einflussgrößen im Zuge dessen Lebens rechtzeitig und angemessen berücksichtigt werden. Die Basis hierfür stellt das *Product-Data-Management-System (PDM)* dar, das als zentrale „Datenbank“ fungiert. (Vajna 2009). Die Software stellt dabei ein Wissensmanagement-System mit mehreren, meist ähnlichen Objekttypen dar. Es ist also ein Konzept, das den Anspruch erhebt, das gesamte Produkt über den kompletten Lebenszyklus hinweg mit unterschiedlichen IT-Systemen zu verwalten (Sendler et al. 2009) und sämtliche Daten, Informationen und Entwicklungen zu speichern (Stjepandic 2015). Gängige PLM-Systeme sind z.B. Teamcenter 8.3 von Siemens Industry Software oder Catia V6 Systems.

## 2.5 Model Based Systems Engineering (MBSE)

Die INCOSE beschreibt das Systems Engineering als interdisziplinären Ansatz, der die systematische Entwicklung von Systemen ermöglichen soll. Hierbei steht das umfassende und kombinierte Verständnis der Anforderungen aller Stakeholder ebenso im Vordergrund wie die Ableitung von Lösungsmöglichkeiten konkreter Probleme sowie deren Verifizierung und Validierung (Incose 2011). Das MBSE ermöglicht ein schnelleres und einfacheres Dokumentenmanagement, indem die erforderlichen Dokumente direkt aus den existierenden Modellen abgeleitet werden. Eine Abbildung des gesamten Systems auf Basis eines einzigen Datenstamms ermöglicht neben einer steten Überprüfung der Modelle hinsichtlich Konsistenz und Kohärenz (God und Hintze 2012; Partsch 2010) auch eine entsprechende Gewährleistung derselben (Hanna & Schwede 2018).

Auf Basis der Unified Modeling Language (UML) der 90er Jahre, die bereits eine graphische Modellierungssprache zur Beschreibung von Objekten leistete und eine Wiederverwendung von abgeschlossenen Einheiten eines Programmcodes ermöglichte (Zingel 2013), wurde 2007 SysML geschaffen, eine durch Tools unterstützte Standardmodellierungssprache für das Systems Engineering (Kaffenberger 2012). Diese Sprache ermöglicht die semantische Beschreibung von Modellen. Deren Mehrwert entsteht darin, dass Entwickler ihre Modelle explizieren und sich auf deren Basis austauschen können (Lamm & Weikiens 2014). Hierzu existieren diverse Tools wie z.B. Cameo Systems Modeler (No Magic) oder Papyrus (The Eclipse Foundation).

## 3 Erweiterung von PLM-Systemen durch MBSE

Einer der Hauptgründe für den Einsatz einer Datenverwaltungssoftware ist deren Einsatz als „*Single-Source-of-Truth*“, d.h. als alleiniger Datenstamm zur konsistenten Datenpflege. Die Wichtigkeit eines solchen Systems zeigt sich mit zunehmenden Umfang der Produkte, v.a. da diese zumeist auch mechanische Anteile aufweisen. Problematisch ist hier allerdings oft, dass die Datenformate der einzelnen Subsysteme nicht immer kompatibel sind, die Ontologie ist demzufolge nicht gewährleistet (Kaufmann et al. 14). Hier kann der Einsatz von MBSE durch den Einsatz der zugrunde liegenden, semantischen Sprache SysML, Abhilfe schaffen.

Durch die Schaffung eines integrierten Metamodells mit interdisziplinärem Charakter kann ein System auf verschiedenen Abstraktionsebenen hinsichtlich dessen Struktur und Verhalten beschrieben werden (Mueggo 2015). EIGNER betrachtet dieses Datengerüst mit dessen modellbasierten Verknüpfungsdarstellung als große Unterstützung für PLM-Systeme (Eigner et al. 2012).

Bisher wurde mittels der Stückliste (BOM) eine physische Itemhierarchie geschaffen, auf deren Basis verschiedene Modelle aus verschiedenen Subsystemen zusammengeführt wurden. Das MBSE eröffnet nun die Möglichkeit, Struktur- und Verhaltensinformationen sowie abstrahierte Verknüpfungen effizient nutzbar zu machen, um einzelne Modelle zu einem zusammenhängenden Metamodell zusammenzuführen (Mueggo 2015). Des Weiteren lassen sich Anforderungen an einzelne Produktarchitekturelemente knüpfen, d.h. Randbedingungen oder Verknüpfungen für Komponenten und Module vorsehen, wie sie z.B. durch den MIG im integrierten PKT-Ansatz vorgegeben werden (Gebhardt et al. 2014).

Des Weiteren lassen sich mittels MBSE individuell angepasste, aber dennoch kompatible Modelle und Methoden in die bestehende Datenstruktur integrieren. EIGNER et al. zeigen auf, dass reine PLM-Systeme hier starke Einschränkungen hinsichtlich der Offenheit und freien Programmierbarkeit aufweisen (Eigner et al. 2012).

Wie bereits unter Kapitel 2.3 beschrieben, hat ein Konfigurator die Aufgabe, die Kundenanforderungen über kundenrelevante Eigenschaften in konkrete Module zu überführen. Dementsprechend muss die Datenbasis eines solchen Konfigurationssystems in der Lage sein, qualitative Daten, wie Anforderungsverknüpfungen und kundenrelevante Eigenschaften etc., abzubilden. Herkömmliche PLM-Systeme haben ihre Stärke hauptsächlich in der Verwaltung von CAD-Daten, für den Einsatz als Datenmodellquelle eines Konfigurators hingegen erscheint der Einsatz eines flexiblen MBSE-Modells als sinnvoll. Dies wird umso deutlicher, wenn man die wichtigsten Anforderungen an Konfigurationssysteme betrachtet: Diese sind auf Basis eines vollständigen Informationssystems eine konsistente Produktkonfiguration sowie die Möglichkeit zur Plausibilitätsprüfung zu ermöglichen (Göbel 2009, Drews 2008). LIEBISCH

zeigt auf, dass dies nur mit dem Einsatz einer geeigneten Modellierungssprache abgebildet werden kann, wie sie durch die Verwendung eines geeigneten MBSE-Tools zur Verfügung gestellt wird (Liebisch 2014).

Als Zwischenfazit lässt sich der Einsatz von MBSE als Erweiterung existierender PLM-Systeme, vor allem aber als Grundlage für ein flexibles, intelligentes Konfigurationssystem deutlich hervorheben. Insbesondere sollen kundenrelevante Eigenschaften in die zu schaffende Modellstruktur als Basis eines Konfigurators integriert werden. SENDLER und WEILKIENS beschreiben die Verknüpfung von PLM und SysML als Grundlage für eine datentechnische Durchgängigkeit, indem nicht nur die Geometrie und Struktur eines Produktes gemanagt werden, sondern auch dessen Logik und Funktionen, welche als Anforderungen hinter diesem System stehen (Sendler, und Weilkiens 2013). Vor allem die Vorwärts- und Rückwärtsintegration aller Systeme ist einer der größten Benefits, die mittels MBSE geschaffen werden. Die Aras Corporation bietet hierzu bereits Schnittstellen, um PLM-Systeme mit MBSE-Software zu verknüpfen (aras corp 2016).

#### **4 Ansätze zur Entwicklung eines MBSE basierten Konfigurationssystems**

In diesem Abschnitt werden Ansätze zur Umsetzung eines MBSE basierten Konfigurationssystems aufgezeigt. Nach HERMANN ist die Konfiguration kundenspezifischer Produkte eine der Kernkompetenzen, die ein Unternehmen zu leisten hat. Hierbei wird ein intelligenter, dynamischer Produktkonfigurator als unumgänglich bezeichnet (Hermann 2013). Wie bereits unter Abschnitt 2.3 beschrieben, ist hier ein konsistenter Datenstamm unbedingt nötig.

Hierzu wurde die einschlägige Literatur mit den Keywords zu modularen Produktstrukturen, PLM basierten Baukastensystemen, MBSE und Konfigurationssystemen hinsichtlich der Keyword-Häufungen untersucht. Hierbei wurde die Anzahl der zugrundeliegenden Beiträge anhand deren Abstracts auf 103 reduziert. Folgende Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Analyse.

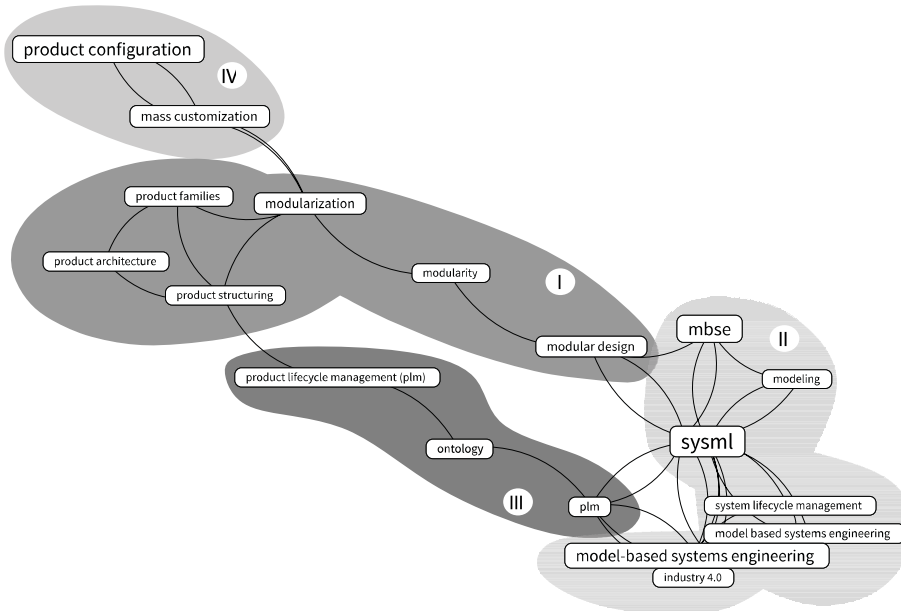


Abbildung 2: Keyword-Analyse

Diese Grafik zeigt deutlich vier einzelne Cluster. Diese sind den Themenbereichen modulare Produktstrukturen (I), MBSE (II), PLM (III) und Produktkonfiguratoren (IV) zuzuordnen. Es wird der aus der Literatur gewonnene Eindruck bestätigt, dass die Verknüpfungen zwischen modularen Produktarchitekturen und MBSE Engineerings sehr ausgeprägt sind. Hierbei ist auch die Erweiterung von PLM-Systemen durch MBSE zur Verwaltung modularer Strukturen deutlich zu erkennen. Diese Datenbasis findet auch Verwendung beim Einsatz von Produktkonfiguratoren.

Es existiert jedoch keine direkte Verknüpfung zwischen Configurationssystemen und dem Themenbereich des MBSE. Wie oben bereits aufgezeigt wurde, ist der Einsatz von MBSE zur konsistenten Datenaufnahme und -verwaltung beim Aufbau intelligenter Produktkonfiguratoren jedoch unumgänglich. Des Weiteren eröffnet die Verwendung einer semantischen Sprache zur Abbildung der Produktarchitektur Möglichkeiten zur rechnergestützten Analyse und Optimierung der existierenden Modulstruktur. Hierzu sind in der Literatur keine Beiträge zu finden. Dieser Beitrag soll einen Weg zum Schließen dieser Lücken aufzeigen.

Folgende Abbildung 3 zeigt schematisch das Konzept eines MBSE-basierte Konfigurationssystems. Ebenfalls wird die darauf aufbauende Bewertung der modularen Produktarchitektur als Datenbasis für eine Produktgenerationsentwicklung aufgezeigt.

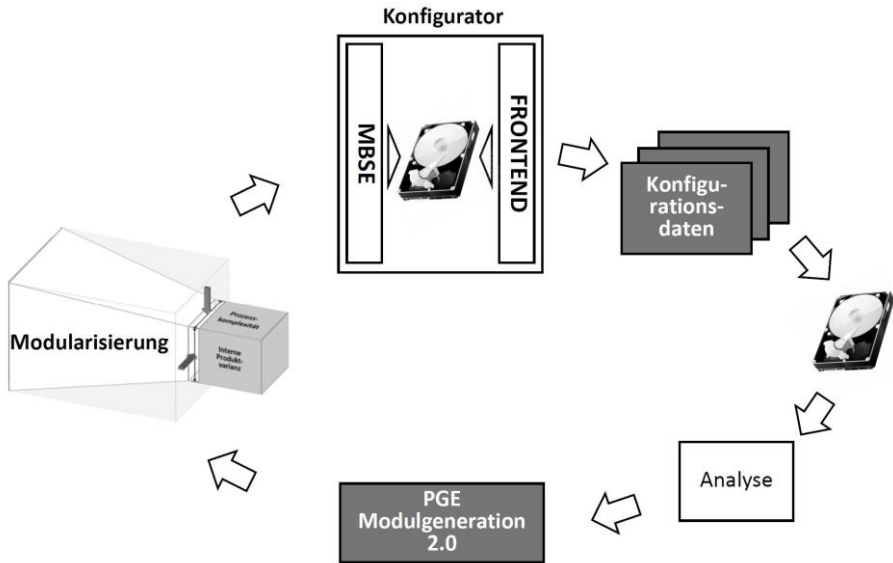


Abbildung 3: Schematischer Aufbau Konfiguration und Analysewerkzeug

Hierbei wird eine methodisch entwickelte, modulare Produktarchitektur, inklusive der Daten, welche bei der methodischen Produktentwicklung generiert werden, in die Softwarestruktur eines geeigneten MBSE-Tools wie z.B. Cameo Systems Modeler überführt. Erste Modelle dazu wurden bereits erstellt (u.a. Bahns et al. 2014, Hanna et al. 2018 und Eichmann et al. 2018). Um ein entsprechendes Konfigurationssystem schnittstellentechnisch unabhängig vom jeweiligen MBSE-Tool zu gestalten, greift das Konfigurationssystem auf eine separate Datenbank zu, die eine Vorwärts- und Rückwärtsintegration des MBSE Tools zulässt. Das Konfigurationstool ermöglicht anschließend die Übersetzung der Kundenanforderungen in kundenrelevante Eigenschaften und lässt somit eine automatisierte Auswahl der zu verwendenden Module zu. Die entsprechende Konfiguration führt zu einer direkten Ausleitung der angebots- und fertigungsrelevanten Unterlagen

(Kostenstruktur, Stückliste, Zeichnungssatz, Verknüpfungsliste etc.) und wird im Nachgang archiviert. Wichtig bei der Gestaltung eines Konfigurators im Bereich des Sondermaschinenbaus ist es, dass das Userinterface und die Auswahl der geeigneten Module kundenspezifische Anpassungen zulässt und diese entsprechend dokumentiert. Im Sondermaschinenbau ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, einen reinen Configure-to-Order (CTO) Prozess, selbst bei einer explizit für diesen Einsatzzweck entwickelten modularen Produktarchitektur, durchlaufen zu können. Infolgedessen muss die Konfigurationssoftware den Prozesspfad des Configure-to-Order-basierten Engineer-to-Order Prozesspfad (Seiler, 2019, eingereicht) ermöglichen. Nach dem Erreichen einer produkt- und unternehmensspezifischen Anzahl an Konfigurationen, kann die modulare Struktur auf Basis der archivierten CTO-ETO-Konfigurationsdatensätze analysiert werden.

Hier sind vor allem diejenigen Punkte interessant, an denen die standardisierte, modulare Struktur kundenindividuell angepasst werden musste. Eine Analyse hinsichtlich Art und Häufigkeit dieser Änderungen können Aufschluss darüber geben, in welchen Aspekten eventuelle Schwachpunkte der existierenden Produktarchitektur existieren. Ebenfalls können die verwendeten Modultreiber, die zum Aufbau der existierenden modularen Struktur definiert wurden, kritisch bewertet werden.

Somit kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die ursprüngliche Modularisierung die tatsächlichen Kundenanforderungen abdecken. Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn kann durch die Analyse der etablierten Kostenstruktur erfolgen. Hierbei können diejenigen Komponenten, die als Hauptkostenträger über die analysierten Konfigurationen auffallen, identifiziert werden. Wichtig dabei ist der Gedanke, nicht die Hauptkostenträger der Produktarchitektur zu identifizieren, sondern diejenigen, die relativ gesehen den größten Einfluss haben, um eine Datenbasis für Design-to-Cost Entwicklungen zu schaffen.

Auf Basis der Erkenntnisse obiger Analyse können Anforderungen an die Produktgenerationsentwicklung abgeleitet werden. Somit ist eine objektivierbare, qualifizierbare und quantitativ belastbare Aussage über die Leistungsfähigkeit des Modulbaukastens sowie den nötigen Änderungen zur Verbesserung des Abdeckungsgrades der Kundenanforderungen durch die

Produktarchitektur möglich. Als einfacher Wert zur Messung der Baukasteneffizienz kann z.B. die Konfigurationstiefe (vgl. Formel 1) herangezogen werden.

$$\text{Konfigurationstiefe} = \frac{\text{Anzahl verwendeter CTO Module}}{\text{Anzahl konfigurierter Module gesamt}}$$

Diese besagt, mit welchem prozentualen Anteil eine Kundenanfrage ohne Änderungen aus dem Baukasten bedient werden kann. Eine Konfigurationstiefe von 100% wäre somit ein reines CTO-Produkt.

Eine solche MBSE-basierte Konfigurationssoftware mit angegliedertem Analysetool kann auch für Simulationszwecke benutzt werden. Dabei kann die Robustheit der existierenden modularen Struktur überprüft werden, indem virtuelle Datensätze generiert werden, in denen sich Änderungen im wirtschaftlichen Umfeld oder im Kundenverhalten widerspiegeln. Somit kann simuliert werden, welchen potentiellen Veränderungen die Produktarchitektur noch gewachsen ist. Bei diesem Ansatz bleibt die modulare Struktur gleich, nur die Umfeldszenarien und somit die Kundenanforderungen ändern sich. Gleichzeitig kann aber auch das Umfeld unverändert sein, während alternative modulare Strukturen getestet werden, um die Optimale unter denselben zu lokalisieren.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein konsistenter, alleiniger Datenstamm als Basis eines (Produkt)-Konfigurators für dessen erfolgreiche Realisierung unabdingbar ist. Hier bietet sich der Einsatz des MBSE als sinnvolle Erweiterung standardmäßig verwendeter PLM-Systeme an, da aufgrund der Möglichkeit, eine Produktstruktur semantisch und modellbasiert abzubilden, eine durchgängige, beidseitige Kommunikation mit allen Datentypen und Systemen eines Unternehmens gewährleistet wird. Auf Basis dessen lässt sich das Ziel formulieren, ein MBSE-basiertes Konfigurationssystem zu schaffen, um das Wissen aus der Modularisierung einem Nutzer intuitiv zugänglich zu machen. Des Weiteren können durch diese neuartige Verknüpfung zwischen Konfigurationssystemen und MBSE Kundenanfragen analysiert werden, um den Abdeckungsgrad der kundenrelevanten Eigenschaften durch



die modulare Struktur zu überprüfen und gegebenenfalls hinsichtlich entsprechender, vorher ausgewählter Kriterien zu verändern. Dies eröffnet auch die Möglichkeit, mittels simulierter Daten oder alternativen modularen Strukturen die Robustheit des Produkt-Markt-Systems zu untersuchen.

Die Entwicklung einer Schnittstelle, die die Umwandlung der MBSE-Datenstruktur in eine vom Konfigurator lesbare umzuwandeln, gilt es demzufolge weiter zu verfolgen. Nach erfolgreicher Umsetzung sollte ein lauffähiges Konfigurationssystem entwickelt werden, um die beschriebenen Analyseroutinen zu entwickeln und zu implementieren. Insgesamt gilt es hierbei, explizit die Herausforderungen aus dem Bereich des Sondermaschinenbaus zu migrieren.

## Literaturverzeichnis

- Andreas, G. (2009): Internationalisierung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen und Konzepte für die Datenhaltung. Diplomarbeit, Jena.
- aras corp (2016): MBSE and the Business of Engineering.
- Bahns, T.; Melzer, S.; God, R.; Krause, D. (2015): Ein modellbasiertes Vorgehen zur variantengerechten Entwicklung modularer Produktfamilien, Tag des Systems Engineering (TdSE), Ulm, pp. 141-150.
- Blees, C. (2011): Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien. TuTech Verlag, Hamburg.
- Bursac, N. (2016): Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung, Dissertation. Stolzenberger, Leimen.
- Drews, M. (2008): Interaction Patterns für Produktkonfiguratoren. In: Mensch & Computer 2008: Viel Mehr Interaktion. Lübeck.
- Ehrlenspiel, K. (2009): Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Auflage. Hanser, München.
- Eichmann, O.; Melzer S.; Hanna M.; God R.; Krause D. (2018): A Model-Based Approach for the Development of Modular Product Families Considering Different Life Phases, EMEA Sector Systems Engineering Conference 2018, EMEASEC 2018 / TdSE 2018, Berlin, Germany.
- Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R. (2012): Proposal for functional product description as part of a PLM solution in interdisciplinary product development. International Design Conference - Design 2012, Dubrovnik.
- Erixon, G. (1998): Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation. The Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Stockholm.
- Erkus, B.; Jakupovic, D.; Oueslati, K. (2014): ProjINF Konfigurator für Produktanforderungen.

- Gebhardt, N.; Bahns, T.; Krause, D. (2014): An example of visually supported design of modular product families. 24rd CIRP Design Conference, Milano.
- Göbel, A (2009): Internationalisierung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen und Konzepte für die Datenhaltung. Diplomarbeit, Jena.
- God, R.; Hintze, H. (2012): Komplexität beherrschen: Methodologie für die modellbasierte Entwicklung von Kabinensystemen. Ingenieurspiegel, Band 1.
- Hanna, M.; Schwede, L-N.; Krause, D. (2018): *Model-Based Consistency for Design for Variety and Modularization*. DSM 2018, Trieste.
- Hermann, M.-O.; Michler, J.; Schönthaler, F. (2013): Wo Kundenwünsche auf technische und wirtschaftliche Notwendigkeiten treffen. Business News 03/2013, abgerufen von <http://bs.doag.org>.
- Herzig, S.; Quamar, A.; Paredis, C. (2014): An approach to Identifying Inconsistencies in Model-Based Systems Engineering. Conference on Systems Engineering Research, CSER 2014.
- IncoSE (2011): Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities. Haskins, C.; Krueger, M.; Walden, D.; Forsberg, K.; Hamelin, R. (Hrsg.) San Diego.
- Kaffenberger, R.; Schulze, S. Weber, H. (2012): INCOSE Systems Engineering Handbuch. München.
- Kaufmann, U.; Pfenning, M. (2014): Was die Produkt- von der Softwareentwicklung lernen kann - durchgängige Integration disziplinspezifischer Modelle durch den Einsatz von Modellierungssprachen. Tagungsband des System Engineerings 2014, Bremen.
- Kipp, T. (2012): Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. TuTech Verlag, Hamburg.
- Kopenhagen, F. (2004): Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen. Berichte aus der Konstruktionstechnik, Shaker, Aachen.
- Kortmann, D.; Klink, H.; Wüpping, J. (2009): Strategien zur profitablen Variantenkonfiguration. In International Journal of Interoperability in Business Information Systems, Issue 3 (2), Oldenburg.
- Krause, D., Gebhardt, N. (2018): Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln. Springer, Hamburg.
- Lamm, J.; Weillkiens, T. (2014): Method for Deriving Functional Architectures from Use Cases. In: Systems Engineering 17.2.
- Liebisch, M. (2014): Aspektorientierte Datenhaltung in Produktkonfiguratoren - Anforderungen, Konzepte und Realisierung. Dissertation, Jena.
- Lindemann, U.; Ponn, J. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten. 2. Auflage. Springer, Heidelberg.
- Mueggo, C.; Pfenning, M. (2015): Die Rolle von MBSE und PLM im Industrial Internet. Tag des Systems Engineering 2015.

- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Heusel, J.; Bonnhuber, T.; Hufenbach, W.; Helms, O.; Schlick, C.; Klocke, F.; Dilger, K.; Müller, R. (2013): Gestaltungsrichtlinien. In Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer, Berlin-Heidelberg.
- Partsch, H. (2010): Requirements-Engineering systematisch. Springer, Berlin.
- Plietz, M. (2011): Patterns in der Produktkonfiguration. In: Tagungsband zum 14. Interuniversitären Doktorandenseminar Wirtschaftsinformatik, Chemnitz.
- Riesener, M.; Schuh, G. (2017): Vom Suchen und Warten zu agilen Entwicklungsprozessen - Product Lifecycle Management im Kontext von Industrie 4.0. IT-Matching.Guide, Aachen.
- Salvador, F. (2007): Towards a Product System Modularity Construct: Literature Review and Reconceptualization. IEEE Transaction and Engineering Management Vol. 54 No. 2.
- Schuh, G. (2015): Leitfaden zur Baukastengestaltung: Ergebnisse des Forschungsprojekts Gestaltung innovativer Baukasten- und Wertschöpfungsstrukturen. VDMA 2015, Frankfurt/Main.
- Sellgren, U.; Törngren, M.; Malvius, D.; Biehl, M. (2009): PLM for Mechatronics integration. International Conference on Product Lifecycle Management.
- Sendler, U.; Weikiens, T. (2013): Modellbasierte Systementwicklung. Was Sie schon immer über MBSE, PLM und Industrie 4.0 wissen sollten (I). Tag des Systems Engineering 2013.
- Stjepandic, J.; Wognum, N. and Verhagen, W. (Eds.) (2015): Concurrent Engineering in the 21st Century: Foundations, Developments and Challenges. Springer International Publishing, Cham.
- Vajna, S. (2009): Plant Lifecycle Management - CAE Anwendungen im Anlagenbau. In Chemie Ingenieur Technik No.08, Magdeburg.
- Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2014): Zukunftsperspektive deutscher Maschinenbau. McKinsey&Company, Frankfurt/Main.
- Zingel, C. (2013): Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips. Dissertation, Karlsruhe.

## **Kontakt**

Florian Seiler, M. Sc.

Lea-Nadine Schwede, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

Technische Universität Hamburg

Lehrstuhl für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik

Denickestr. 17

D-21073 Hamburg

<https://www.tuhh.de/pkt>

# Branchenübergreifendes Benchmarking von variantenreichen Produktportfolios auf Basis von Produktstrukturen

Christian Wyrwich und Georg Jacobs

## 1 Motivation

Die fortschreitenden Möglichkeiten digitaler Kommunikation und der Globalisierung erweitern traditionelle Absatzmärkte produzierender Unternehmen. Hersteller haben einen Wettbewerbsvorteil, wenn sie in der Lage sind, kundenindividuelle Produkte in der Qualität, der Lieferzeit sowie dem Preis eines Großserienerzeugnisses anzubieten. Einen Ansatz dazu stellen modulare Produktbaukästen für die effiziente Umsetzung eines variantenreichen, marktgerechten Produktportfolios, bei gleichzeitiger Nutzung von Skalen- sowie Lernkurveneffekten dar (Arnoscht et. al 2010). Das Potential des Baukastens lässt sich jedoch nur nutzen, wenn dieser die Bedürfnisse des Marktes ausreichend bedient und wenn er Verwendung findet. Dies erfordert die kontinuierliche Überprüfung und Steuerung des gesamten Produktportfolios.

## 2 Forschungsproblem und Forschungsziel

Für die Messung von Prozessabläufen wie der Beschaffung (Supply Chain), der Arbeitsvorbereitung und der Produktion werden spezifische Unternehmenskennzahlen genutzt. Diese *Key Performance Indicator* (kurz: *KPI*) bilden häufig jedoch ausschließlich finanzielle Aspekte für eine unternehmensinterne Überwachung ab und berücksichtigen nicht den Entwicklungsprozess. Alternative Ansätze verwenden aus dem Expertenwissen der Mitarbeiter zusammengetragene Informationen, die durch ihre Subjektivität die Reproduzierbarkeit erschweren.

In Abgrenzung zu bestehenden Konzepten wird in diesem Beitrag die Effizienz-Bewertung von variantenreichen Produktportfolios auf Basis der Produktstrukturen sämtlicher realisierter Erzeugnisvarianten beschrieben. Diese objektive Datengrundlage ist in Form von Strukturstücklisten der Erzeugnisse hinterlegt und aus dem PDM-System eines Unternehmens rechnergestützt analysierbar. Die Quantifizierung der Portfolio-Effizienz erfolgt mit Hilfe von KPI. Diese ermöglichen die Ausleitung charakteristischer Portfolioeigenschaften aus dem Unternehmenswissen und zeigen erste Optimierungsansätze für die Portfolio-Gestaltung auf (siehe Abbildung 1). Die allgemeine Formulierung der KPI ermöglicht darüber hinaus ihren unternehmensübergreifenden Vergleich.

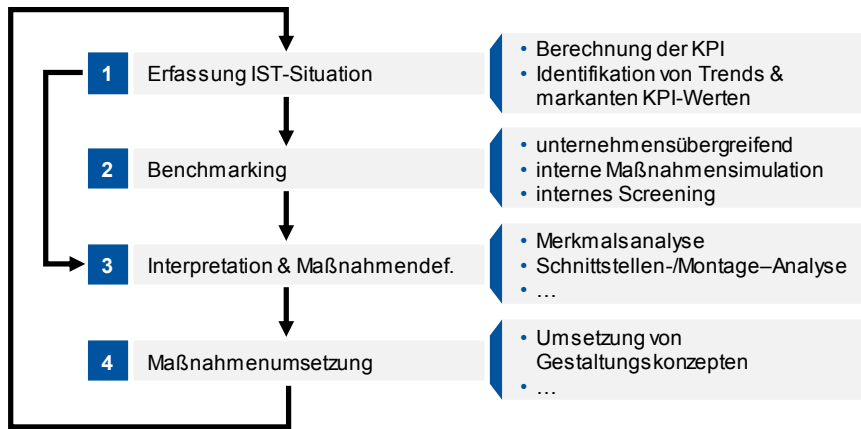


Abbildung 1: Portfoliooptimierung

### 3 Stand der Technik und Abgrenzung

Durch die Bedeutung des physischen Produktaufbaus für den gesamten Lebenszyklus des Erzeugnisses sowie das Produktportfolio existieren kennzahlbasierte Bewertungsansätze in Literatur und Praxis. Um die bestehenden Konzepte zum vorliegenden Beitrag abzugrenzen, werden folgende Kriterien betrachtet:

1. Produktstruktur im Fokus der Analyse
2. Nutzung einer objektiven Datenbasis
3. Aufbau eines definierten KPI-Systems
4. Unternehmensübergreifende Vergleichbarkeit der KPI

Bereits 1992 entwickelten Kaplan und Norton die *Balanced Scorecard* als Reaktion auf die Kritik der finanziellen Ausrichtung konventioneller Managementsysteme. Die *Balanced Scorecard* beruht auf der ausgewogenen Betrachtung der vier Dimensionen *finanzielle Perspektive*, *Kundenperspektive*, *interne Prozessperspektive* sowie der *Lern- und Entwicklungsperspektive*. Durch die Betrachtung von Ursache-Wirkungsbeziehungen werden die angestrebten Unternehmensziele miteinander verknüpft und jeweils auf einen finanziellen Aspekt zurückgeführt. Kaplan und Norton legen jedoch bewusst kein zu verwendendes KPI-Paket fest, da diese entsprechend der Unternehmensausrichtung zu bestimmen sind. Zudem wird kein konkreter Bezug zu Produkten oder dem Aufbau eines Produktportfolios hergestellt. Eine Bewertung des Portfolios ist damit nicht möglich. (Horváth & Partners 2004, Kaplan et. al 1996)

Der als *Modularisierungs-Balanced-Scorecard* bezeichnete Ansatz von Junge baut auf der *Balanced Scorecard* von Kaplan und Norton auf, der Fokus liegt hier jedoch auf der modularen Struktur. Die eigens definierten Kennzahlen werden aus den Perspektiven *Finanzwirtschaft*, *Marketing/Vertrieb*, *Entwicklung* und *Produktion* angewendet. Notwendige Informationen für die KPI-Berechnung wie die Anzahl an Schnittstellen oder optimale Montagezeiten basieren jedoch auf subjektiven Experteneinschätzungen, wodurch die Vergleichbarkeit sowie Reproduzierbarkeit der Werte beeinflusst wird. Der beschriebene Ansatz fokussiert sich zudem auf die Automobilindustrie, die branchenübergreifende Anwendbarkeit stellt keine Anforderung dar. (Junge 2005)

Der Ansatz *Performance Measurement of Modular Product Platforms* von Rudolf, Schuh und Vogels hingegen definiert ein umfangreiches Kennzahlensystem, bei dem die konkret verwendeten KPI jedoch für jeden Wirtschaftszweig individuell ausgewählt werden. Abhängig von den Unternehmensinteressen erfordert das Vorgehen zudem die subjektive Gewichtung der Messwerte. (Rudolf et. al 2014)

Weitere Ansätze wie die *Bewertung des Komplexitätsgrades von Unternehmen* nach Rennekamp oder das *Controlling von Produktbaukästen* nach Vogels legen ihren Fokus auf die unternehmensinterne Verwendung der KPI. Vogels nutzt zudem mit der Anzahl an Varianten, die den letzten Prozessschritt verlassen oder der Anzahl an Schnittstellen zwischen Modulen Daten, die nicht

direkt aus der Strukturstückliste ausgeleitet werden können. (Rennekamp 2013, Vogels 2015)

Eine andere Ausrichtung besitzt der Ansatz *Key Performance Indicators for Design and Engineering* nach Beisheim und Stotz. Der konkret für die Entwicklung und Konstruktion definierte KPI Standardisierungsgrad wird ohne direkten Portfoliobezug auf Komponentenebene angewendet. Durch die Bestimmung der Messgröße für sämtliche Sachnummern werden die Komponenten als Preferred Part, Service Part oder Run-out Part klassifiziert. Die Einordnung und Markierung der Komponenten innerhalb des PDM-Systems führt zu einer unternehmensinternen Bauteilstandardisierung und erhöht die Gleichteilennutzung. Die Auswirkungen durch die Zuweisung der Komponenten-KPI auf die Portfolio-Effizienz wird nicht betrachtet. (Beisheim et. al 2013)

Auch PDM- sowie ERP-Systeme ermöglichen die Extraktion von Unternehmenswissen mit Hilfe moderner Data-Mining-Methoden. Diese setzen ihren Fokus jedoch vorrangig auf grundlegende Informationen wie das Produkt-Teile-Verhältnis, die Anzahl nicht freigegebener Teile oder eine Betrachtung der Lieferanten ohne eine konkrete Betrachtung der Portfolioentwicklung (Gröpper et. al 2013). Bei der Analyse eines Produktportfolios durch Unternehmensberatungen hingegen werden vielfach Fragebögen für die Datenerhebung genutzt, sodass die verfügbaren Informationen subjektiv generiert werden.

#### **4 Verwendete Methoden, Vorgehensweise**

Aufbauend auf den bestehenden Ansätzen erfolgt die Definition geeigneter KPI zur quantitativen Bewertung und Vergleichbarkeit von Produktportfolios auf Basis von Produktstrukturen. Traditionelle Kennzahlen und Kennzahlensysteme konzentrieren sich überwiegend auf direkte finanzielle Zusammenhänge in Unternehmensabläufen. Die grundlegende Entwicklung eines Produktes und das in ihr enthaltene Mitarbeiterwissen wirken sich jedoch zeitversetzt in maßgebender Weise auf den wirtschaftlichen Erfolg aus. Mehrdimensionale Steuerungssysteme beziehen aus diesem Grund weitere, nicht monetäre Inhalte bei der Effizienz-Bestimmung mit ein. Die Leistungsmessung durch eine ganzheitliche Betrachtung von Unternehmensabläufen wird als *Performance Measurement* bezeichnet. (Menninger et. al 2011)



Die im Umfeld des *Performance Measurement* verwendeten Kennzahlen werden nach Hilgers ebenfalls als *Key Performance Indicator* bezeichnet (Hilgers 2008). Diese KPI sollen nach Parmenter und Spiess die folgenden drei Grundkriterien erfüllen (Parmenter 2010, Spiess 2013):

1. KPI sind auf die Erreichung eines Zieles bezogen und stellen den Grad der Zielerfüllung bezüglich eines definierten Zielzustandes dar. Es handelt sich deshalb um Verhältniszahlen.
2. KPI stellen relevante Sachverhalte in konzentrierter Form dar.
3. KPI enthalten eine konkrete Handlungsanweisung.

#### Anforderungen an die KPI auf Basis von Produktstrukturen

Neben diesen generellen Eigenschaften von KPI ergeben sich weitere Anforderungen bereits aus der grundsätzlichen Idee des Portfolio-Benchmarking auf Basis von Produktstrukturen. Diese werden im Folgenden erläutert.

*Verwendung von in der Produktstruktur enthaltenen Informationen:* Der Ansatz des vorliegenden Beitrages beruht auf der Verwendung einer objektiven Datenbasis, die generell vorausgesetzt und praxistauglich mit geringem Aufwand generiert werden kann. Die Datenbasis bilden, wie in Abbildung 2 exemplarisch aufgeführt, sämtliche Auftragsstücklisten verkaufter Produkte. Diese enthalten die technisch sinnvollen und seitens des Marktes nachgefragten Produktvarianten und tragen somit das Wissen für ein optimiertes Produktportfolio (Schmitz 2017). Für das Benchmarking der variantenreichen Produktportfolios besteht die Anforderung der allgemeingültigen Anwendbarkeit. Diese Eigenschaft reduziert die verfügbaren Informationen auf grundsätzlich vorauszusetzende Spalteneinträge der Strukturstückliste. Als Repräsentant der Produktstruktur stellt diese die Zusammensetzung des Produktes aus Komponenten, Modulen und Baugruppen dar (Feldhusen et. al 2013). Die Strukturstückliste entsteht nach Eigner bei der Dokumentation einer Produktstruktur vom Erzeugnis bis zu den Einzelteilen und ihren Ausgangsmaterialien (Eigner 2009). Die Produktstruktur hat zudem direkten Einfluss auf sämtliche Phasen des Produktlebenszyklus, da sie bereits in der Entwicklungsphase definiert wird (Feldhusen et. al 2013). Varianten- sowie Modifikationen werden darüber hinaus durch das beständige Einpflegen von Änderungen ebenfalls von der Produktstruktur dokumentiert (Feldhusen et. al 2013).

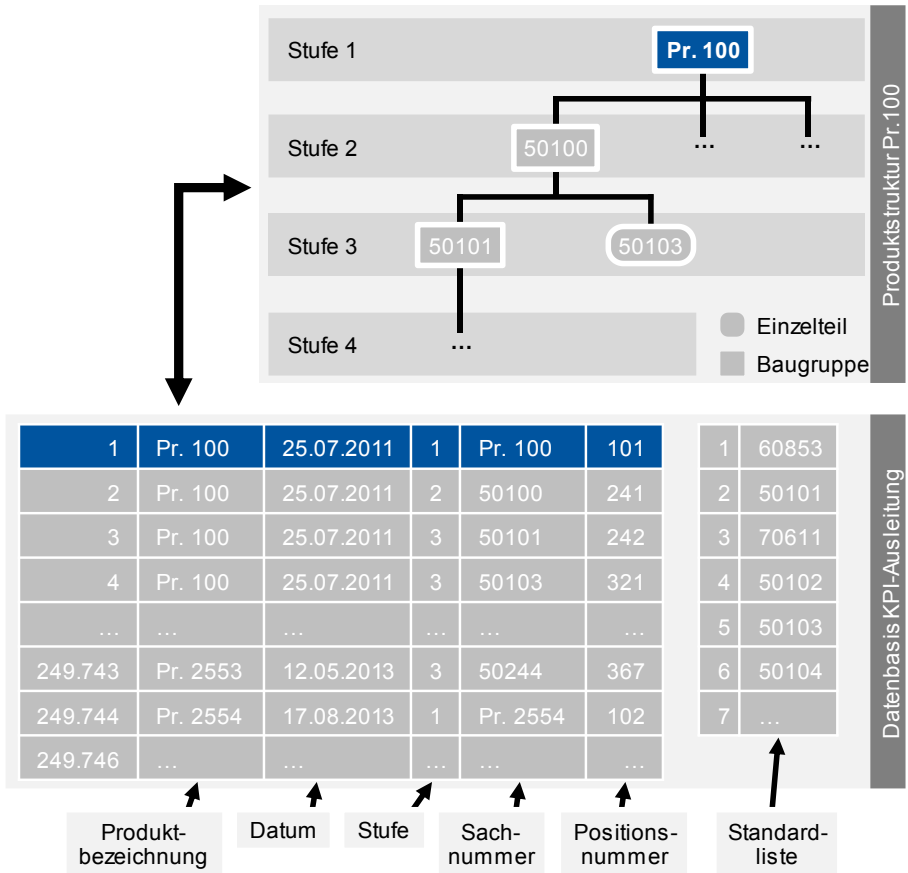


Abbildung 2: Datenbasis und Produktstruktur

Bedingt durch die Produktstruktur als Datenbasis und eine praxistaugliche Generierung der Informationen wird bewusst auf die folgenden Informationen verzichtet:

- *Anzahl an Modulschnittstellen*: Die Auswertung der Modulschnittstellen erfordert die Auswertung von CAD-Daten, sodass diese Daten nicht unmittelbar aus den Strukturstücklisten ausgeleitet werden können.
- *Kosten*: Die Bestimmung belastbarer Kostenwerte für die Produktvarianten ist schwierig, da die klassische Zuschlagskalkulation die verursachten Kosten nur unzureichend widerspiegelt. Zudem

handelt es sich bei den konkreten Herstellkosten um sensible Unternehmensdaten, die für die Analyse nicht vorausgesetzt werden können.

- *Verkaufszahlen von Produktvarianten*: Die analysierten Auftragsstücklisten beschreiben als eindeutige Listen die realisierten Produktvarianten. Die Anzahl der Verkäufe einzelner Produktvarianten wird nicht erfasst.

*Möglichkeit zur vollautomatisierten Ausleitung*: Die automatisierte KPI-Ausleitung über ein geschlossenes Programm ermöglicht die praxistaugliche Handhabung umfangreicher Datensätze sowie die Generierung reproduzierbarer Ergebnisse. Auch Änderungsschleifen können dadurch mit wesentlich geringerem Zeitaufwand realisiert werden.

*Verwendung von unabhängigen KPI*: Durch eine starke Korrelation zweier KPI ergibt sich aus beiden Messgrößen lediglich eine Aussage. Diese Wechselwirkungen werden als *statistische Abhängigkeit* bezeichnet (Bourier 2011). Die definierten KPI-Berechnungsvorschriften erfordern somit die Überprüfung hinsichtlich der unabhängigen Aussagefähigkeit.

*Unternehmensübergreifende Vergleichbarkeit*: Die Berücksichtigung von z.B. dem *Produktumfang*, der *Anzahl an Produkten* oder dem *betrachteten Zeitraum* als Bezugspunkte normiert die KPI, sodass die Messwerte unternehmensübergreifend in einem Benchmarking miteinander verglichen werden können.

*Ausgabe eines Zahlenwertes in dem Bereich 0 ... 1*: Die Festlegung des Wertebereiches ermöglicht die Interpretation sowie Vergleichbarkeit der eingelesenen Werte anhand des theoretischen Maximums sowie dem aktuellen Best-Practice-Wert. Durch den Zahlenwert 1,0 wird der Bestwert der KPI im Sinne des effizienten Portfolioaufbaus beschrieben.

## Bewertungskriterien eines variantenreichen Produktportfolios

Bevor die KPI erstellt werden können, ist es erforderlich zu beschreiben, wie die Effizienz eines variantenreichen Produktportfolios gemessen werden kann und welche Informationen für die Leistungsmessung zur Verfügung ste-

hen. Da die Produktstruktur implizit Daten des gesamten Produktlebenszyklus enthält, werden zudem Informationen betrachtet, die indirekt bestimmbar sind.

Auf Basis der betrachteten Ansätze und genereller Eigenschaften erfolgt die Erarbeitung charakteristischer Portfolio-Kriterien produzierender Unternehmen. Die im Folgenden aufgeführte Abbildung 3 zeigt einen Auszug dieser Eigenschaften:

Eckdaten	Produktgröße, Anzahl Produkte, Anzahl Stufen, ...
Teilenutzung u. Varianz	Produktübergreifende Wiederverwendung, Anzahl Varianten, Entkopplungspunkt, Nutzung einer Referenzproduktstruktur, ...
Fertigung	Fertigungstiefe, Anzahl Lieferanten, Anzahl Montageschritte, ...
Absatz	Verteilung der Stückzahlen, zeitliche Entwicklung des Portfolios, ...
Kosten	Verteilung der Funktionskosten, Verteilung des Umsatzes, ...
...	...

Abbildung 3: Bewertungskriterien eines variantenreichen Produktportfolios

### Datenbasis

Die Ermittlung der KPI aus realen Datensätzen erfordert die Verwendung von Merkmalen, die in Unternehmen üblicherweise hinterlegt werden. In der Praxis haben sich für die Erstellung eines Produktes Mindestanforderungen an den notwendigen Inhalt einer Stückliste etabliert. Ergänzend zu dem Minimalinhalt dieser technischen Dokumentation stehen durch die IT-gestützte Datenerhebung weitere Informationen zur Verfügung. So hinterlegt das PDM-System beispielsweise die Zugehörigkeit der Komponenten zu einem spezifischen Produkt und Datumsangaben. Weit verbreitet ist zudem die Kategorisierung von Sachnummern als unternehmensinterner Standard zur Steigerung der produktübergreifenden Gleichteilenutzung. Die nachfolgende Abbildung 4 fasst die Informationen zusammen, die als voraussetzbar eingestuft werden. Die Einträge der *Benennung* sowie der *Menge* werden für das Portfolio-Benchmarking jedoch bewusst nicht verwendet. Dadurch erfordern inkonsistente Benennungen keine vorherige Datenaufbereitung und Mengenangaben von Norm- sowie Kleinteilen können keinen überproportionalen Einfluss auf die Analyseergebnisse nehmen.

<b>PB</b>	Produktbezeichnung	Erzeugnisbezeichnung zur Identifikation der Produktstrukturen in dem Gesamtdatensatz
<b>D</b>	Datum	Anlagedatum eines Eintrages zur Analyse der Portfolioentwicklung
<b>St</b>	Stufe	Gliederungsebene der Strukturstückliste
<b>SN</b>	Sachnummer	Eindeutige Bezeichnung jedes Elementes der Strukturstückliste
<b>PN</b>	Positionsnummer	Zuordnung der Stücklisteneinträge zu den Elementen der technischen Zeichnungen
<b>SL</b>	Standardliste	Unternehmensintern als Standard definierte Elemente
<b>B</b>	Benennung	Bezeichnung zur Vermittlung der Eigenschaften eines Elementes
<b>M</b>	Menge	Anzahl an Einheiten eines Stücklisten-Eintrages

Abbildung 4: Informationen für die Ermittlung der KPI

### Geeignete Portfoliokriterien für das Produktstruktur-Benchmarking

Nach der Festlegung der verfügbaren Datenbasis wird bewertet, ob die aufgeführten Bewertungskriterien eines variantenreichen Produktportfolios auf Basis der Informationen der Strukturstücklisten bestimmt werden können. Betrachtet wird nicht ausschließlich die Fähigkeit zur direkten Ausleitung der KPI, sondern zudem die indirekte Ausleitung über Zusammenhänge des strukturellen Produktaufbaus. So wird ermittelt auf welchen Gliederungsebenen der Produktstruktur die unternehmensinternen Standardelemente verwendet werden, um Aussagen über den Zeitpunkt der Varianzeinbringung in die Produkte treffen zu können.

### Definition der Key Performance Indicator

Die Definition von acht KPI erfolgt durch die Formulierung konkreter Berechnungsvorschriften. Diese quantifizieren die realisierbaren Bewertungskriterien des Produktportfolio-Benchmarking. Abbildung 5 fasst die KPI zusammen und verdeutlicht die bewerteten Portfoliokriterien in jeweils einer

Leitfrage der Messgrößen. Die Betrachtung des Portfolios erfolgt allgemein und bezogen auf charakterisierende Eigenschaften von Produkten sowie Einträgen der zugrundeliegenden Strukturstücklisten.

	Key Performance Indicator		KPI-Leitfrage
	<b>Standardisierungsgrad</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Standardisierung</li> </ul>	SG	Wie hoch ist die <b>Nutzung</b> eines vorhandenen <b>Produkt-Baukastens</b> ?
	<b>Plattformnutzungsgrad</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• produktübergreifende Wiederverwend.</li> <li>• Nutzung einer Referenzproduktstruktur</li> </ul>	PNG	Besteht ein <b>einheitlicher Produktkern</b> innerhalb des Portfolios?
	<b>Vernetzungsgrad</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• produktübergreifende Wiederverwend.</li> <li>• Nutzung einer Referenzproduktstruktur</li> </ul>	VG	Wie groß ist die produktübergreifende <b>Verwendung</b> von <b>Gleichteilen</b> ?
	<b>Modularisierungs-Index</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entkopplungspunkt</li> <li>• Vergleich Vor- / Endmontage</li> </ul>	MI	Wo liegt der <b>Entkopplungspunkt</b> der Produkte?
	<b>Unikatvermeidung</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• produktübergreifende Wiederverwend.</li> <li>• Entkopplungspunkt</li> </ul>	UV	Wird eine Vielzahl von <b>Sachnummern</b> in nur <b>einem Produkt</b> verwendet?
	<b>Strukturähnlichkeit</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung einer Referenzproduktstruktur</li> </ul>	SAE	Besteht eine <b>Ähnlichkeit</b> in dem <b>physischen Aufbau</b> der Produkte?
	<b>Sachnummer-Verwendung</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• zeitliche Entwicklung des Portfolios</li> </ul>	SNV	Wie hoch ist die <b>Wiederverwendung</b> von Sachnummern im <b>zeitlichen Verlauf</b> ?
	<b>Variations-Index</b> <i>Bewertungskriterien:</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl an Varianten eines Produktes</li> </ul>	VI	Bestehen <b>Ungleichmäßigkeiten</b> der <b>Sachnummer-Verwendung</b> an Positionsnummern?

Abbildung 5: Key Performance Indicator

Exemplarisch soll im Folgenden der KPI *Vernetzungsgrad* detaillierter betrachtet werden. Dabei werden die Vorgehensweise der Ausleitung aus dem Datensatz und die anschließende Interpretation des Zahlenwertes erläutert.

### Der Vernetzungsgrad im Detail

Die Ausleitung des Vernetzungsgrades basiert auf der paarweisen Bestimmung der Gleichteileanzahlen für das gesamte Portfolio. Für jeweils zwei auf Komponentenebene miteinander verglichene Produkte wird die Anzahl an gemeinsam verwendeten Sachnummern bestimmt. Über ein Vernetzungsschaubild (siehe Abbildung 6) kann die Anzahl der Gleichteile im Portfolio dargestellt werden. Verknüpfungen zwischen zwei Produkten repräsentieren die Gleichteileverwendung, wobei die Linienstärke mit der Anzahl der Gleichteile zunimmt.

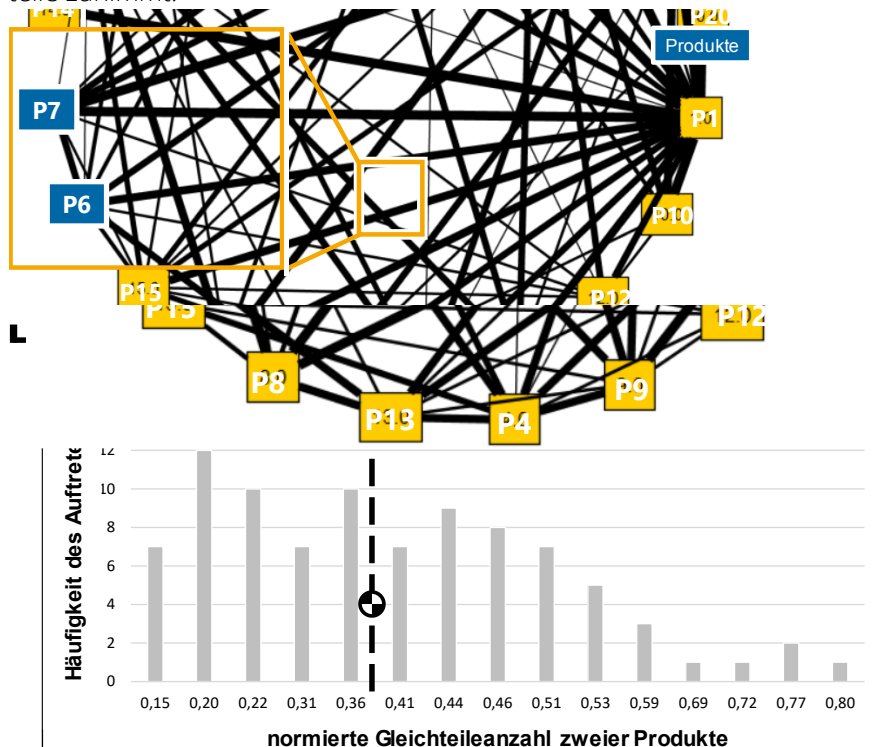


Abbildung 6: Datenbasis und Ausleitung des Vernetzungsgrades

Die Verteilung der Häufigkeit des Auftretens sämtlicher normierter Gleichteileanzahlen ergibt das Säulendiagramm in Abbildung 6. Die Normierung erfolgt über den Bezug auf den jeweiligen Produktumfang der betrachteten zwei Produkte und gewährleistet die unternehmensübergreifende Vergleichbarkeit. Über die Ermittlung des x-Anteils des Flächenschwerpunktes ergibt sich schließlich der KPI *Vernetzungsgrad*.

**Berechnungsvorschrift *Vernetzungsgrad***

$VG = \frac{\sum_{k=1}^e (n_{ij,k} \times VG_{ij,k})}{\sum_{k=1}^e n_{ij,k}}$ <p style="margin-top: 10px;"><b>mit:</b> <math>VG_{ij} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{k_{ij}}{k_{ges.i}} + \frac{k_{ij}}{k_{ges.j}} \right)</math></p>	<p><b>e:</b> absolute Anzahl an eindeutigen <math>VG_{ij}</math></p> <p><b><math>VG_{ij}</math>:</b> normierte Gleichteileanzahl der Produkte i u. j</p> <p><b><math>k_{ges.i}</math>:</b> Gesamtkomponentenanzahl des Produktes i</p> <p><b><math>k_{ges.j}</math>:</b> Gesamtkomponentenanzahl des Produktes j</p> <p><b><math>k_{ij}</math>:</b> Gleichteileanzahl der Produkte i u. j</p> <p><b><math>n_{ij}</math>:</b> Häufigkeit des Auftretens der <math>VG_{ij}</math></p>
---	---

Abbildung 7: Berechnungsvorschrift des Vernetzungsgrades

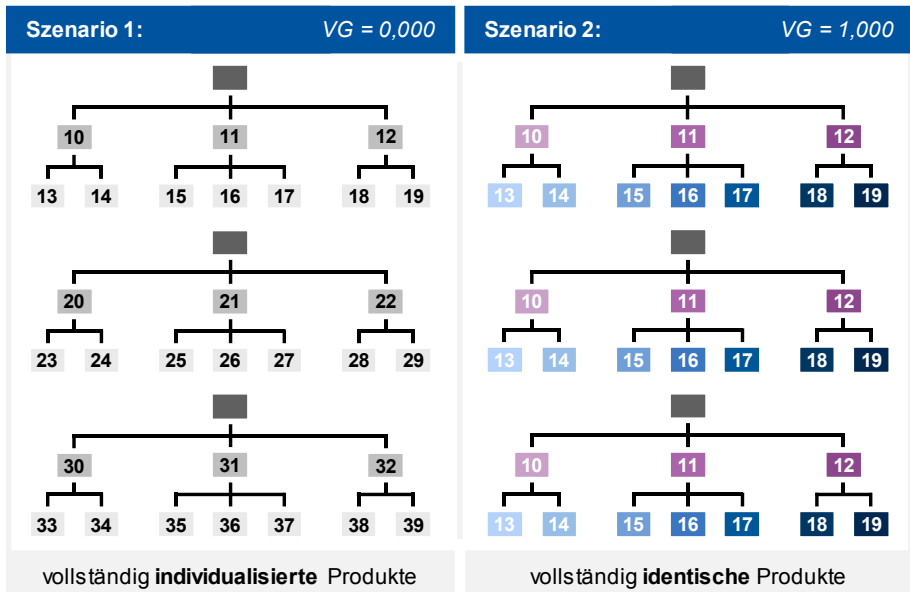


Abbildung 8: Portfolio-Szenarien des Vernetzungsgrades



Das in Abbildung 6 dargestellte Vorgehen zur Berechnung des Vernetzungsgrades ist über eine konkrete Berechnungsvorschrift formuliert (siehe Abbildung 7). Dieser mathematische Ausdruck ermöglicht die softwaregestützte, automatisierte Ausleitung des KPI über einen Algorithmus.

Die Überprüfung der Konsistenz der KPI-Werte erfolgt anhand von fiktiv entwickelten Portfolio-Szenarien. Diese simulieren maximale Ausprägungen eines Datensatzes. Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Szenarien des Vernetzungsgrades für den theoretischen Minimal- sowie Maximalwert. Neben der Erzeugnisbezeichnung setzen sich die Produkte aus jeweils zehn Sachnummern zusammen. Diese Einzelteile und Baugruppen verteilen sich auf bis zu drei Gliederungsebenen.

## 5 Anwendung des Produktstruktur-Benchmarking

Nach der Definition des KPI wird der Vernetzungsgrad im Folgenden auf drei reale Datensätze angewendet. Bei den betrachteten Auftragsstücklisten handelt es sich um Produktportfolios aus unterschiedlichen technischen Fachbereichen (siehe Abbildung 9).



		Anzahl an Produkten	Anzahl an Stücklistenzeilen	Anzahl an eindeutigen Sachnummern
	Hrst. von Planetengetrieben	1.152	196.668	6.576
	Hrst. von Kassenautomaten	645	250.618	2.721
	Hrst. von Servomotoren	1.355	157.617	5.825

Abbildung 9: Herstellerdatensätze

### Unabhängigkeit der KPI

Die Überprüfung der Plausibilität der erzielten KPI-Werte erfolgt initial an Stichproben-Datensätzen, um bspw. Normierungsfehler identifizieren zu können. Neben der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit erfolgt die Überprüfung der KPI auf mögliche Abhängigkeiten der Messgrößen. Nach Bourier unterscheidet sich die Abhängigkeit von Merkmalen in die *statistische* sowie die *sachliche Abhängigkeit* (Bourier 2011). Während die statistische Abhängigkeit

lediglich einen Zusammenhang der Entwicklung der vorliegenden Zahlenreihen betrachtet, wird durch die sachliche Abhängigkeit die Möglichkeit einer Kausalität untersucht. Eine hohe mathematisch berechnete Korrelation dient als Indikator für einen ausgeprägten Zusammenhang, jedoch ist dieser zusätzlich auf eine logische Abhängigkeit zu überprüfen. Bleibt eine sachliche Begründung aus, handelt es sich um eine Schein- oder Pseudokorrelation (Bourier 2011). Um die KPI auf ihre Unabhängigkeit zu prüfen und zufällig auftretende Wechselbeziehungen abschätzen zu können, werden diese in drei Schritten untersucht:

*Vergleich der Berechnungsvorschriften:* Ergibt sich durch Gleichsetzen der KPI-Berechnungsvorschriften mit  $0 = 0$  oder  $1 = 1$  eine wahre Aussage, wird eine der Messgrößen aufgrund der identischen Ergebnisse nicht weiter betrachtet.

*Aufstellen der Korrelationen der KPI-Datenreihen in der Validierungs-Anwendung:* Mit der Korrelationsanalyse besteht die Möglichkeit zur mathematischen Quantifizierung der Stärke des Zusammenhanges zweier Datenreihen. Als eine der bekanntesten Kenngrößen misst der in Abbildung 10 dargestellte *Korrelationskoeffizient*  $r$  von Bravais-Pearson den linearen Zusammenhang der zwei Merkmale  $x$  und  $y$ , die in diesem Beitrag durch die Ergebnisreihe jeweils eines KPI beschrieben werden (Bourier 2011). Nach der Ermittlung der acht KPI für die Hersteller-Datensätze erfolgt die Berechnung sämtlicher Korrelationskoeffizienten der Datenreihen. In Verbindung mit der Überprüfung auf zufällig auftretende Abhängigkeiten werden keine mathematisch ausgeprägten Zusammenhänge nachgewiesen. Somit werden die Aussagen der KPI als unabhängig angenommen.

*Betrachtung von Szenario-Datensätzen:* Bei hohen berechneten Korrelationskoeffizienten erfolgt die Betrachtung von Szenario-Datensätzen. Lässt sich ein Produktportfolio simulieren, das zu unterschiedlichen Messwerten zweier KPI führt, handelt es sich bei der mathematisch bestimmten Korrelation um zufällig auftretende Scheinabhängigkeiten.

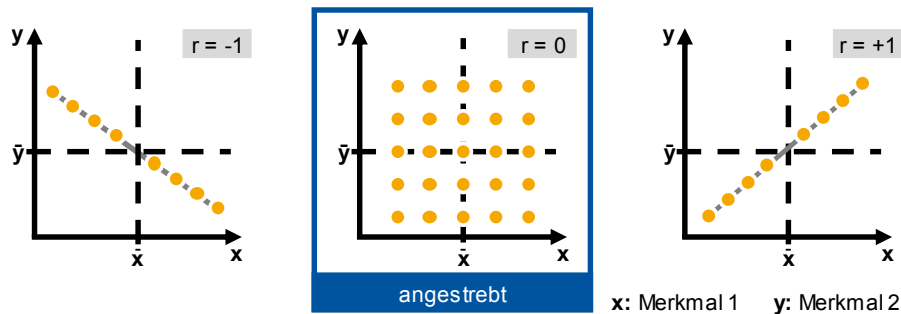


Abbildung 10: Korrelationskoeffizient  $r$  nach Bravais-Pearson

## Benchmarking und Geheimhaltung

Die Effizienzbewertung eines Produktportfolios über die Ausleitung der KPI stellt die Erfassung der Ist-Situation dar. Die ermittelten Ergebnisse sind im Anschluss zu interpretieren und in geeignete Maßnahmen zu überführen. Zudem können die KPI im Rahmen eines Benchmarking mit bereits erzielten Best Practice-Werten verglichen werden, um ein wettbewerbsfähiges Produktniveau erreichen bzw. erhalten zu können (Kempf et. al 2008). Abhängig von der Ausdehnung des Bereichs der Vergleichsdurchführung kann das Portfolio-Benchmarking die drei folgenden Ausprägungen annehmen:

- *Unternehmensübergreifendes Benchmarking*: Die Überprüfung der eigenen Leistungsfähigkeit durch den Vergleich mit den besten Industriepraktiken. Das externe Benchmarking erfordert jedoch eine ausreichende Anzahl an brancheninternen Vergleichspartnern oder Referenzwerte weiterer Wirtschaftszweige.
- *Interne Maßnahmensimulation*: Festgelegte Handlungsanweisungen für das Portfolio werden nach der Erfassung des Ist-Zustandes anhand einer ausgewählten Anzahl an Produktvarianten umgesetzt. Die erneute Ausleitung der KPI validiert die simulierten Maßnahmen oder führt zu deren Anpassung.
- *Internes Screening*: In festgelegten zeitlichen Intervallen erfolgt die Berechnung der KPI, um Trends zu identifizieren, die auf Kostentreiber schließen lassen.

Abbildung 11 zeigt das Benchmarking der Vernetzungsgrad-Werte für die drei eingeführten Hersteller-Produktportfolios sowie die Visualisierung der

KPI in jeweils einem Vernetzungsschaubild. Entsprechend der Zahlenwerte ergibt sich aus dem niedrigsten Vernetzungsgrad eine vergleichsweise aufgehellte Abbildung durch eine geringere Anzahl von Verknüpfungslinien sowie geringere Linienstärken. Erst der Vergleich mit dem Referenzpunkt der gemessenen Bestleistung (Benchmark) ordnet jedoch die betrachtete Leistungsfähigkeit ein (Kempf et. al 2008).

Anhand des Vernetzungsschaubildes des Planetengetriebe-Herstellers zeigt sich, dass unabhängig von der Höhe des berechneten KPI Ansatzpunkte der Portfoliooptimierung ermittelt werden können. Über diese Darstellungsweise lassen sich z.B. durch die hohe Anzahl von Verknüpfungslinien mögliche Referenzprodukte identifizieren.

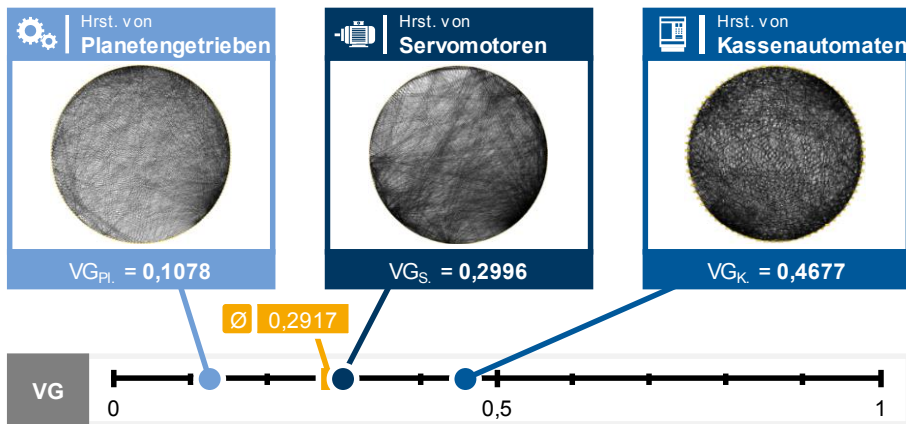


Abbildung 11: Benchmarking des Vernetzungsgrades

Bei dem konkreten Aufbau eines Produktportfolios handelt es sich um sensible Daten eines produzierenden Unternehmens. Die Anwendbarkeit der Bewertung von Produktportfolios in der industriellen Praxis erfordert aus diesen Grund einen angepassten Umgang mit den Strukturstücklisten der Produktvarianten. In diesem Sinne verhindert bereits das Entfernen der Komponentenbenennung eine eindeutige Interpretation der dokumentierten Produktstrukturen. Bedingt durch die automatisierte Ausleitung der Kennzahlen besteht zudem die Möglichkeit zur Codierung der ausgegebenen Informationen. Bleibt der generelle Aufbau der Stücklisten erhalten, können sämtliche Informationen über ein Chiffriersystem codiert werden. Generell

ist es zudem möglich, die KPI vor Ort auszuleiten, sodass die Stücklistendaten die Unternehmensgrenze nicht überschreiten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen bewegen sich im Spannungsfeld zwischen der kundenindividuellen Sonderfertigung und der kostenorientierten Verwendung von Gleichteilen. Der systematische und marktgerechte Aufbau eines variantenreichen Produktportfolios stellt somit einen Schlüsselfaktor erfolgreicher Unternehmen dar (Feldhusen et. al 2013). Zur Bewertung und Quantifizierung der Eigenschaften eines variantenreichen Produktportfolios erfolgt die Definition von acht *Key Performance Indicator*. Die KPI dienen der Identifikation von Komplexitätstreibern und basieren auf üblichen Informationen einer Strukturstückliste. Diese Datengrundlage beschreibt die physikalischen Abhängigkeiten der Erzeugniselemente durch die Produktstruktur und setzt sich aus dem objektiven Unternehmenswissen zusammen.

Der KPI *Vernetzungsgrad* beschreibt beispielsweise die durchschnittliche Gleichteilennutzung in sämtlichen Produktvarianten eines Portfolios. Zudem ermöglicht die Identifikation von Erzeugnissen mit einer erhöhten Anzahl an Verknüpfungen Erkenntnisse über potentielle Referenzprodukte einer Produktfamilie.

Die Analyse eines Produktportfolios anhand der KPI ermöglicht das Aufzeigen von Anhaltspunkten zur Effizienzsteigerung der Portfoliogestaltung in kurzer Zeit und mit einfachen Mitteln. Unternehmensintern ermöglicht die KPI-Berechnung in regelmäßigen zeitlichen Intervallen z.B. die Prüfung der Wirksamkeit umgesetzter optimierender Maßnahmen.

Der Verzicht auf separat zu erfassendes und subjektives Expertenwissen ermöglicht die Aufstellung unternehmensübergreifend anwendbarer Berechnungsvorschriften. Neben der internen Maßnahmenvalidierung können die KPI somit in einem externen Benchmarking verwendet werden. Dieser Vergleich bietet die Möglichkeit zur Einordnung der erzielten KPI und somit die Effizienz-Bewertung des Portfolioaufbaus an einem tatsächlich realisierten Best-Practice-Wert. Jedoch ersetzt die Berechnung der KPI keine detaillierte Betrachtung des Variantenmanagements, unter Einbeziehung der Unternehmensausrichtung.

Weiteres Potential besteht in dem Aufbau einer Datenbank, als Zusammenfassung von bereits durchgeführten Unternehmensanalysen. Somit ergibt sich die Gelegenheit zur Identifikation von Abhängigkeiten zwischen Unternehmenscharakteristika und erzielten KPI-Werten.

## Literaturverzeichnis

- Arnoscht, J., Lenders, M, Rudolf, S., Schuh, G. 2010: Effizienter innovieren mit Produktbaukästen, Studienergebnisse und Leitfaden – ein Beitrag zu Lean Innovation. <https://lean-innovation.de/de/veroeffentlichungen/PS-Baukasten.pdf>, 05.01.2017
- Beisheim, N. & Stotz, F. 2013: Key Performance Indicators for Design and Engineering. In: Bil, C. (Hrsg.); Rock, G. (Hrsg.); Stjepandić, J. (Hrsg.): Concurrent Engineering Approaches for Sustainable Product Development in a Multi-Disciplinary Environment. Proceedings of the 19th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. London: Springer
- Bourier, G. 2011: Beschreibende Statistik, Praxisorientierte Einführung, Mit Aufgaben und Lösungen. 9. Aufl. Wiesbaden: Gabler
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.) 2013: Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Berlin: Springer
- Gröpper, M. & Schabacker, M. 2013: Prozessindikatoren für die Produktentwicklung. Engineering-Prozesse einheitlich bewerten. <http://www.machinery.tv/de/video/-/video/7977>, 19.01.2017
- Horváth & Partners (Hrsg.) 2004: Balanced Scorecard umsetzen. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag
- Junge, M. 2005: Controlling modularer Produktfamilien in der Automobilindustrie. Entwicklung und Anwendung der Modularisierungs-Balanced-Scorecard. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag
- Kaplan, R. S. & Norton, D. P. 1996: The Balanced Scorecard. Translating Strategy into Action. Boston: Harvard Business School Press
- Kempf, S. & Siebert, G. 2008: Benchmarking. Leitfaden für die Praxis. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag
- Menninger, R., Möller, K., Robers D. 2011: Innovationscontrolling. Erfolgreiche Steuerung und Bewertung von Innovationen. 1. Aufl. Stuttgart: Schäffer Poeschel
- Parmenter, D. 2010: Key Performance Indicators. Developing, Implementing, and Using Winning KPIs. 2. Aufl. USA: John Wiley & Sons
- Rennekamp, M. 2013: Methode zur Bewertung des Komplexitätsgrades von Unternehmen. 1. Aufl. Aachen: Apprimus
- Rudolf, S., Schuh, G., Vogels, T. 2014: Performance Measurement of Modular Product Platforms. In: Variety Management in Manufacturing. Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2014, Volume 17, 266-271

Schmitz, K. H. 2017: Ermittlung modularer Produktarchitekturen auf Basis von Unternehmenswissen. Aachen: Shaker Verlag

Spiess, M. 2013: Entwicklung von Key Performance Indicators zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes entlang einer Supply Chain im Bereich der Lebensmittelindustrie. [https://www.itpl.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Abschlussarbeiten/DA\\_2013\\_Spiess.pdf](https://www.itpl.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Abschlussarbeiten/DA_2013_Spiess.pdf), 07.11.2016

Vogels, T. 2015: Controlling von Produktbaukästen. 1. Aufl. Aachen: Apprimus

## **Kontakt**

Christian Wyrwich, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs

RWTH Aachen University

Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung

Schinkelstraße 10

52062 Aachen

[www.imse.rwth-aachen.de](http://www.imse.rwth-aachen.de)





# Aspekte der Authentizität bei der Umsetzung eines künstlerischen Entwurfs mit 3D-Software-Werkzeugen

Wolfgang Steger, Christine Schöne und Helmut Nitsche

## Fragestellung

Friedrich Press war ein namhafter Bildhauer und Gestalter, der bis zu seinem Tod 1990 in etwa 40 überwiegend ostdeutschen Kirchen Werke geschaffen hat. Ein umfangreiches, von Press maßgeblich bestimmtes Projekt ist die 1970 begonnene Neugestaltung der Kirche Sankt Josef in Dresden. Der Entwurf des Künstlers umfasst auch ein Relief für die Brüstung der Orgelempore, dessen Herstellung durch die Kirchgemeinde seit 2013 diskutiert und etwa 2014- 2018 realisiert wurde. Da Friedrich Press 1990 verstorben ist, war eine unmittelbare Mitwirkung bei der Realisierung nicht möglich.

Authentizität bedeutet Echtheit im Sinne von „als Original befunden“ (wikipedia 2019). Authentizität ist keine objektive Kategorie, sondern von der Wahrnehmung und Interpretation der Rezipienten geprägt. In der bildenden Kunst ist die Authentizität eines Werkes unbestritten, wenn der Künstler das Werk eigenhändig schafft. Dies trifft für Maler, Bildhauer oder Grafiker zumindest weitgehend zu, die nur unwesentlich auf Fähigkeiten und Mitwirkung anderer Menschen zurückgreifen müssen, um ihre Ideen in Werke umzusetzen. Anders ist die Situation in der Baukunst oder in der Produktgestaltung, wo der Architekt oder Designer seinen Entwurf nicht selbst handwerklich umsetzen kann. Die Arbeitsteilung bewirkt zwangsweise Abweichungen von der ursprünglichen Gestaltungsidee. Meist wird man entsprechende Werke dennoch dem entwerfenden Gestalter zuschreiben und insofern das Werk als authentische Umsetzung einer Entwurfsidee beurteilen.

Eine Skulptur wird unter verschiedenen Aspekten wahrgenommen. Neben der Gesamtform und der Komposition der Bestandteile, die aus dem Entwurf

klar hervorgehen, bestimmen auch Material, Farbe, Textur und Einordnung in den räumlichen Kontext die Wahrnehmung der Skulptur. Diese Merkmale sind durch den Entwurf oft weniger dokumentiert und entstehen erst im Prozess der Umsetzung. Es ist davon auszugehen, dass eine vollständig authentische Umsetzung der künstlerischen Intentionen nicht möglich ist.

Abweichungen von der Entwurfsidee können verschiedene Ursachen haben:

- Gezielte Änderungen durch ökonomische oder technische Zwänge
- Unterschiedliche Interpretation der vorliegenden Entwürfe durch Ausführende
- Fehlende Informationen werden im Lauf des Planungs- und Umsetzungsprozesses ergänzt

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Realisierung des von Friedrich Press entworfenen Reliefs an der Orgelempore und der Frage, inwieweit das Ergebnis als authentisches Werk des Künstlers gesehen werden kann.

## **Ausgangssituation**

Zu Beginn des hier beschriebenen Vorhabens war die Umgestaltung der Kirche bereits zu großen Teilen abgeschlossen. Es entstand ein funktionaler, lichter Kirchenraum. Die vorherrschenden Werkstoffe sind helle Mauern, Betonflächen und natürlich erscheinendes Holz. Die für Friedrich Press typischen, stark reduzierten und dennoch ausdrucksstarken Gestaltungselemente dominieren insbesondere den Altarraum (Abbildung 1). Gegenüber dem Altarraum befindet sich der Eingang in den Kirchenraum und darüber die Orgelempore. Deren Brüstung wurde mit Holz verkleidet, da zunächst keine Realisierung des Reliefs möglich war.

Die Brüstung der Empore ist als Stahlbetonwand ausgeführt und abgewinkelt ca. 26 Meter lang und 1,30 Meter hoch (Abbildung 2). Der 11,5 Meter lange Mittelteil der Brüstung ist gegenüber den äußeren Teilen um knapp 2 Meter zurückgesetzt.



Abbildung 1: Kirche Sankt Josef in Dresden, Blick zum Altar

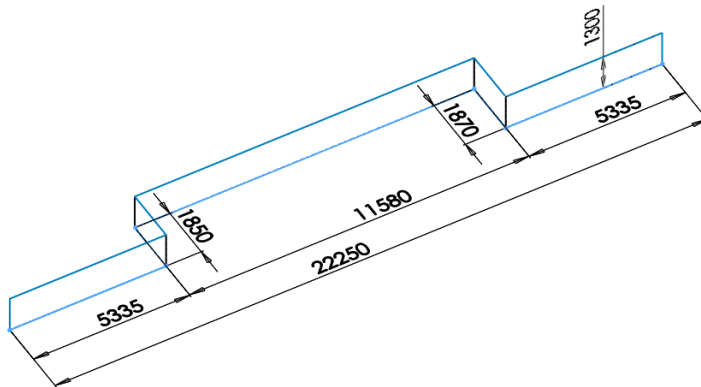


Abbildung 2: Maßliche Charakterisierung der Emporenbrüstung, Maße in mm

## Vorhandene Entwürfe

Der von Friedrich Press geschaffene Entwurf für das Relief zeigt Situationen aus dem Leben Jesu (Abbildung 3). Der Entwurf, den Friedrich Press im Maßstab 1:20 aus Gips hergestellt hat, ist im Besitz der Gemeinde erhalten geblieben. Er zeigt die Gesamtkomposition der Figurengruppen und wurde im Dialog zwischen Gemeinde und Künstler entwickelt und mehrfach verändert.



Abbildung 3: Gipsmodell von Friedrich Press, ca. 1975

Neben dem Gipsmodell ist ein auf drei Transparentpapierrollen verteilter Plan des Reliefs vorhanden. Dieser wurde von Press als maßstäbliche Vorlage für die Schalung angefertigt. Die Schalung sollte direkt an der Emporenbrüstung montiert und mit massivem Beton ausgegossen werden. Der Schalungsplan stellt eine relativ präzise Unterlage dar, auf deren Basis ein digitales Modell des Reliefs erstellt werden kann.

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem Schalungsplan. Deutlich sind die Umriss der Figuren zu erkennen. Daneben enthält der Plan römische Zahlen von I bis V. Diese kennzeichnen das Höhenniveau, wobei die Flächen mit größeren Zahlen stärker hervortreten. Höhenniveau 0 entspricht der Oberfläche der Emporenbrüstung. In Anbetracht der ursprünglichen technologischen Bedingungen wird angenommen, dass die Höhenniveaus zueinander den gleichen Abstand haben (entsprechend der Dicke des Schalungsmaterials), also das Relief aus fünf gleich dicken Schichten aufgebaut ist. Zur Dicke der Schichten bzw. des Schalungsmaterials finden sich keine Hinweise. Einige Flächen sind schraffiert. Diese Schraffuren kennzeichnen einen schrägen Übergang zwischen Schichten. Dabei verlaufen die Schrägen über eine oder mehrere Schichten.

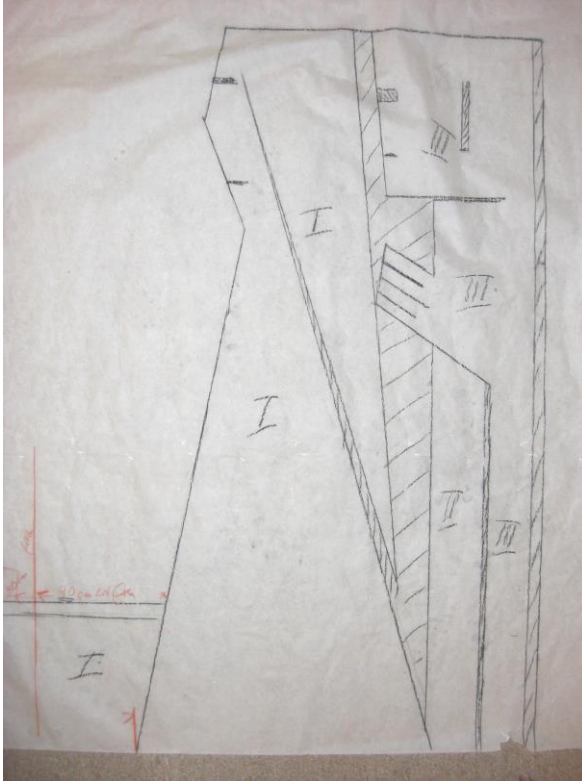


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Schalungsplan mit eingezeichneten Höhenniveaus und Übergangsflächen (Friedrich Press, ca. 1977)

## CAD-Modellierung für die Gesamtkomposition und Grobform

Mit dem CAD-System SolidWorks wird zunächst ein parametrisches 3D-Modell des Reliefs erzeugt. Die Transparentpläne werden fotografiert, skaliert und zusammengesetzt. Die Bilder dienen im CAD-System als Vorlage für Konturlinien, aus denen die Figuren ausgetragen wurden.

Nicht alle Konturlinien und Schichtungen sind dem Schalungsplan eindeutig entnehmbar. Beispielsweise wird die linke Figur in Abbildung 4 durch eine etwa diagonal verlaufende schraffierte Fläche geschnitten. Da gleichzeitig beiderseits der Schraffur Schicht I als Höhenkennzeichnung angegeben ist, können die Flächen nicht durch eine Schräge verbunden werden. Vermutlich

ist jedoch mit einer leichten Vertiefung als Trennung der von Press bezweckte Effekt zu erreichen.

Im weiteren Verlauf trennt die schraffierte Fläche die linke von der rechten Figur (ebenfalls Abbildung 4). Als Schichtinformationen sind für die linke Figur die I und für die rechte eine II angegeben. Eine Schräge kann zwischen beiden Schichten nicht exakt konstruiert werden, da die Begrenzungslinien der Schrägungsfläche nicht parallel sind. Die Schrägungsfläche muss zusätzlich leicht verdreht werden.

Im CAD lassen sich für die skizzierten Problemfälle Lösungen finden. Allerdings kann dabei nur versucht werden, den Intentionen von Friedrich Press weitgehend zu entsprechen. Zu Lebzeiten hat Friedrich Press die handwerkliche Umsetzung seiner Entwürfe meist persönlich begleitet und Lösungen im Detail spontan entschieden. Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass die Gesamtkomposition eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Plan aufweist. In der Grobgestalt entstehen aus Modellierungsgründen zusätzliche Konturlinien für nicht präzise dokumentierte Details.

Abbildung 5 zeigt eine Ansicht der Baugruppendatei mit dem kompletten Relief, Abbildung 6 zeigt eine der acht Figurengruppen.

Bei der beschriebenen Vorgehensweise zur Erstellung eines Modells, das die Gesamtkomposition und die Grobgestalt der einzelnen Figurengruppen enthält, kann eine hinreichende Übereinstimmung mit den handgezeichneten Plänen festgestellt werden. Gegenüber einer präziseren, fotogrammetrischen Aufnahme entsteht ein Fehler von ca. 3 % durch optische Verzerrungen und die teilweise freie Linienführung auf den Plänen.

Die Übereinstimmung der Ausführung mit dem maßstäblichen Schalungsplan ist gut. Zumindest in Bezug auf die Grobgestalt und die Proportionen der Figuren kann von einer authentischen Umsetzung gesprochen werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 7 eine Figurengruppe des Reliefs im Plan und nach der Realisierung.

Gegenüber einem diskreten, oberflächenbasierten Geometriemodell bietet die analytische, parametrische 3D-CAD-Geometrie einige Vorteile. So lassen sich jederzeit Abmessungen variieren und beliebige Schnitte und Ansichten anfertigen, was gerade bei der Fertigungsplanung nützlich ist.

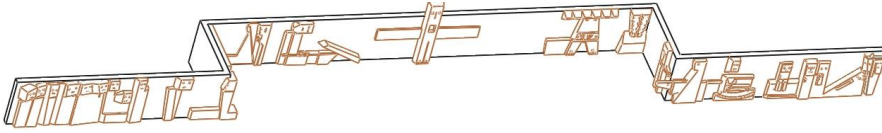


Abbildung 5: Ansicht der CAD-Baugruppe des kompletten Reliefs

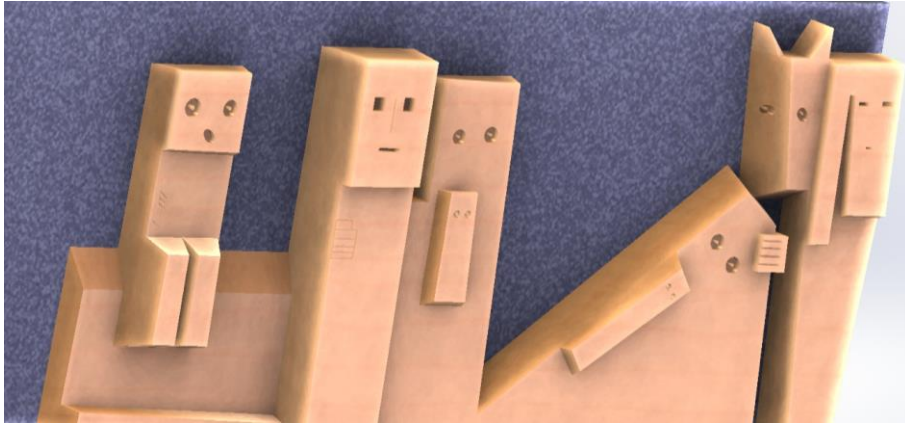


Abbildung 6: Ansicht des CAD-Modells einer Figurengruppe  
(rechte Gruppe aus Abbildung 5) (rechts)

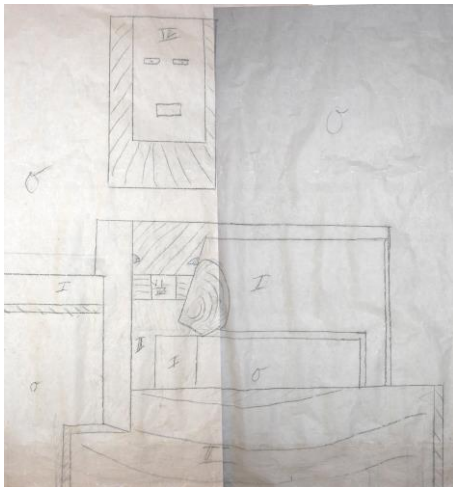


Abbildung 7: Vergleich einer Figurengruppe auf dem Schalungsplan (links)  
und nach der Realisierung (rechts)

## Materialauswahl und Herstellungsplanung

Die ursprüngliche Idee, das Relief aus vor Ort gegossenem Beton herzustellen, wird heute von der Gemeinde abgelehnt und wäre wegen der außerordentlichen handwerklichen und technischen Anforderungen kaum realisierbar. Auch die ästhetischen Vorstellungen verändern sich. Mittlerweile identifiziert sich die Gemeinde nicht mehr mit einem massiv gegossenen Betonrelief, sondern bevorzugt Holz als Material für die Ausführung.

Die Entscheidung fiel für die Ausführung des Reliefs in Lindenholz. Die einzelnen Schichten wurden ausgesägt und miteinander verklebt, um die Grundform der Figuren zu bilden. Alle Sichtflächen sind handwerklich geglättet. Die Schichtdicke wurde aus handwerklicher Erfahrung und aus den gegebenen Größenverhältnissen mit 35 mm gewählt, da keine Anhaltspunkte aus dem Entwurf von Friedrich Press vorhanden sind.

Die ausführende Tischlerei erhielt aus den CAD-Daten abgeleitete Pläne. Für die Herstellung wurden die Figurengruppen im CAD in handhabbare Teile zerlegt. Dabei wurden Gewicht, Schwerpunktlage und Befestigung an der Brüstungswand berücksichtigt.

Weiterhin wurden schichtweise Zuschnittpläne aus dem 3D-Modell abgeleitet und als Datei übergeben. Bei der Ableitung wurde eine passende Gestaltung der Kontaktstellen zwischen Figuren angestrebt, um ein günstiges Fugenbild zu erzeugen und Stoßfugen zu vermeiden. Abbildung 8 zeigt die Gestaltung mit Überdeckung auf unterschiedlichen Höhenniveaus. Alternativ wäre auch eine Herstellung aus textilverstärktem Beton möglich gewesen, der die gleiche Erscheinung wie massiver Beton haben könnte. Das Relief hätte dann nur aus einer etwa 10 mm dicken Schale bestanden und hätte unaufwändig hergestellt werden können. Zu Lebzeiten des Künstlers bestand diese technologische Alternative nicht.

Die Umsetzung mit Textilbeton wäre den ursprünglichen Vorstellungen von F. Press möglicherweise näher gekommen, hätte aber auch ein zusätzliches – bisher nicht sichtbares – Material an die Wände des Kirchenraums gebracht. Entsprechende Muster fanden keine Zustimmung in der Gemeinde.



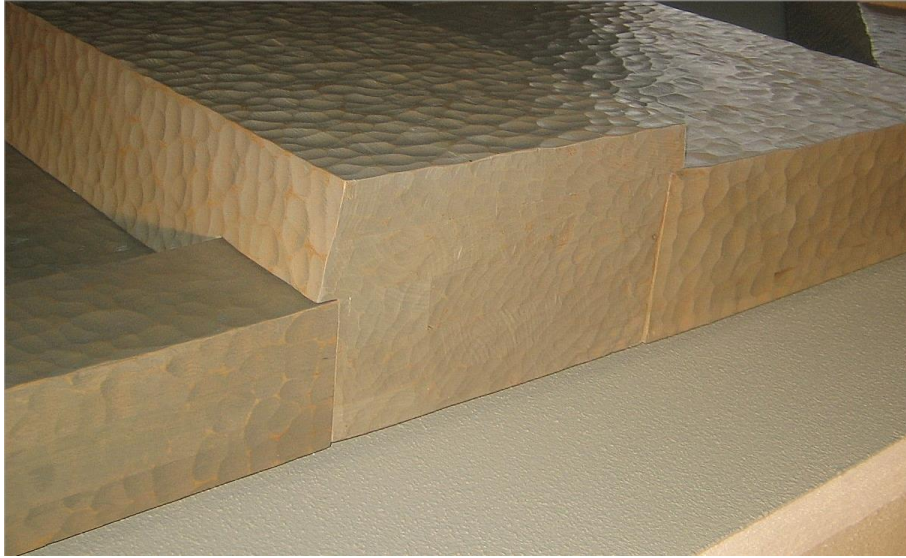


Abbildung 8: Fugen zwischen Teilfiguren (Blickrichtung auf die Reliefunterseite nach oben)

## Farbe und Oberflächenstruktur

Friedrich Press ist für seine rauen, stark texturierten Oberflächen bekannt. Die reduzierte und konzentrierte Formensprache setzt sich damit in gewissem Sinn in der sparsamen Behandlung der Oberflächen seiner Werke fort.

Abbildung 9 links zeigt eine Pieta aus Lindenholz mit farbig gebeizten Abschnitten. Sie entstand etwa in derselben Zeit, als sich Press mit dem Entwurf des Reliefs für die Orgelempore befasste. Die Holzoberfläche erscheint überwiegend grob bearbeitet, enthält aber auch wenige feiner ausgearbeitete Konturen in der stilisierten Dornenkrone und den Gesichtszügen Jesus.

Die Skulpturen von Press zeigen in den 1970er Jahren überwiegend gebeizte und gekalkte Oberflächen. Geglättete oder geschliffene Flächen sowie eine Endbehandlung mit Wachs, Lack, Lasur oder ähnlichen Beschichtungen fehlen komplett oder sind extrem zurückhaltend verwendet.

Insofern nimmt die gewählte Oberflächenstruktur des neuen Reliefs in St. Josef den Charakter von Werken, die zur gleichen Zeit gestaltet wurden, nur teilweise auf. Im vergleichsweise dargestellten Ausschnitt in Abbildung 9 rechts ist die grobe Oberflächenstruktur sichtbar, die nach der Herstellung

der zunächst glatten Figuren handwerklich erzeugt wurde. Eine Endbehandlung der Oberflächen erfolgte mit farbigen Beizen und Wachs, das glatt und sogar leicht glänzend erscheint. Für die Beständigkeit der Farbgestaltung und als Schutz vor Vergilbung ist dies sicher ein Vorteil. Die Farbtöne wurden an Figuren von Friedrich Press angelehnt.

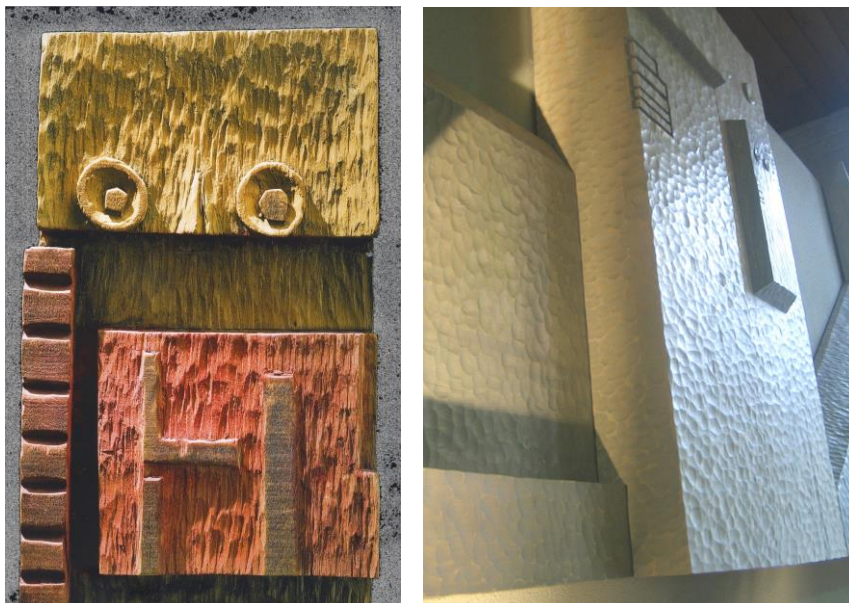


Abbildung 9: *Pieta* von Friedrich Press aus dem Jahr 1974 (Deuter 2013) mit typischer Farbigkeit und Struktur (links) und Detail aus dem Relief *St. Josef* (rechts)

## Gestaltungsdetails

Aus dem von Press erarbeiteten Schalungsplan gehen naturgemäß keine gestalterischen Details hervor. Allerdings sind durchaus Hinweise auf beabsichtigte Gesten oder Gesichtsausdrücke enthalten. Beispielsweise gibt es ganz unterschiedliche, wenn auch grobe Vorgaben zur Augenform (eher rund oder rechteckig, nur mit Strichen angedeutet, mit oder ohne Pupille). Einige Varianten zeigen die vorhergehenden Abbildungen 4,6, und 7.

Abbildung 10 zeigt die Figur „der zwölfjährige Jesus lehrt im Tempel“. Bei der Realisierung wurde ein von Friedrich Press häufig eingesetztes gestalteri-

ches Mitte aufgenommen. Bereiche der Gesichtsfläche sind leicht gekrümmt und betonen den Mund oder bilden die Nase. Auch die Augen sind im Verhältnis zum Schalungsplan plastisch ausgearbeitet und unterstreichen den Ausdruck der Figur.



Abbildung 10: Vergleich der Detailgestaltung an einer Figur, Ausschnitt des Schalungsplans (links) und entsprechendes Detail nach der Realisierung (rechts)

Weitere näher ausgearbeitete Details sind Hände, zum Teil dargestellte Finger oder Handgesten. Streng geometrisch ausgeführte Konturlinien hat Press genutzt, um besondere Blickpunkte in seinen Skulpturen zu schaffen. Die handwerkliche Realisierung folgt hier sehr präzise den Vorgaben des Papierplans. Eine digitale Vorlage für die detaillierte Gestaltung zu erarbeiten, wäre im dargestellten Projekt extrem aufwändig gewesen. Die Umsetzung

wurde hier dem handwerklichen Geschick und der Erfahrung der Ausführenden überlassen.

### **VR-Szene für Entscheidungsfindung und Kommunikation**

Ausgehend von einem 3D-Scan des Kirchenraums wurde ein VR-Modell vom existierenden Kirchenraum erstellt. Die neu zu gestaltende Brüstung wurde anstatt der Holzverkleidung als helle Sichtbetonfläche dargestellt und das modellierte Relief erschien auf der Fläche.

Der besondere Schwerpunkt lag auf texturierten Oberflächenmodellen im unmittelbaren Umfeld der Emporenbrüstung, um das Relief beispielsweise in der Wechselwirkung zu Fenstern und Türen zu beurteilen und verschiedene Materialdarstellungen zu vergleichen.

Die fertiggestellte VR-Szene wurde mit einem großformatigem stereoskopischen Projektionssystem bei einer Gemeindeversammlung vorgestellt. Diese Präsentation des Reliefs im baulichen Gesamtumfeld wurde äußerst positiv aufgenommen, da sie eine gute Vorstellung vermittelte. Mit der Präsentation wurde ein lebhafter Meinungsbildungsprozess in der Gemeinde angeregt.

Zwei Hoffnungen, die hinsichtlich der zu planenden Fertigung und Gestaltung des Reliefs bestanden, konnte die VR-Präsentation nicht erfüllen:

1. Das gestalterische Konzept des Reliefs geht von einem schichtweisen Grundaufbau aus. Für die Dicke der einzelnen Schichten sind aus den Entwürfen keine Anhaltspunkte zu entnehmen. Auch aus der VR-Szene können hinsichtlich der Festlegung der Schichtdicke keine Hinweise abgeleitet werden. Trotz des guten Raumeindrucks und der gut möglichen Bewertung des baulichen Gesamtbildes ist die konkrete maßliche Dimensionierung von Gestaltelelementen schwierig, wenn nur die stereoskopische Projektion dafür herangezogen werden kann. In der Realität beruht die räumliche Bewertung einer Situation noch auf einigen weiteren Aspekten, die die VR-Szene nicht oder nur unvollkommen darstellt.
2. Die Lichtsituation beeinflusst die Wahrnehmung des Reliefs erheblich. Dabei tritt im Kirchenraum der St. Josef Kirche sowohl einseitig einfallendes Tageslicht als auch von oben einfallendes

Kunstlicht auf. Schattenwurf und Oberflächentexturierung konnten nicht zufriedenstellend beurteilt werden. Wesentliche Defizite lagen in der Modellierung der Lichtquellen und deren kontrastreicher Projektion, um beispielsweise seitlich einfallendes Sonnenlicht zu simulieren. Die VR-Simulation konnte dabei keinen realitätsnahen Eindruck erzielen.

## Resumee

Da die vorhandenen Entwürfe eines Künstlers die konkrete handwerkliche Ausführung nicht vollständig dokumentieren, stellt sich die Frage einer authentischen Realisierung besonders, wenn der Künstler nicht direkt Einfluss auf die Realisierung nehmen kann und der Entwurf längere Zeit zurückliegt.

Digitale Modelle können sehr nützlich sein, den räumlichen Eindruck des Kunstwerks, die Komposition und die grobe Gestalt zu bewerten. Gleichfalls erleichtern digitale Modelle und Werkzeuge die Planung der Herstellung enorm.

In der konkreten Umsetzung sind die Materialwahl und –anmutung durch den veränderten Zeitgeschmack, technologische Entwicklungen und die persönliche Handschrift der Ausführenden beeinflusst. Da kann die Umsetzung den Vorstellungen des ursprünglichen Entwurfs nur begrenzt entsprechen. Auch die Möglichkeiten digitaler Werkzeuge sind in diesem Bereich begrenzt.

Im konkreten Fall endet mit der Realisierung des letzten Bausteins ein über fast 50 Jahre dauernder Umgestaltungsprozess einer Kirche. Abbildung 11 zeigt einen Teil des Reliefs bei der festlichen Einweihung. Für die künstlerische Qualität des in den 1970er Jahren erarbeiteten Entwurfs spricht, das auch die letzte Phase mit außerordentlicher Unterstützung der gesamten Gemeinde erfolgte, die mehrheitlich weder den Künstler persönlich kennen gelernt hat, noch an der ursprünglichen Planung beteiligt war. Auch lange nach der unmittelbaren Wirkungszeit von Friedrich Press ist mit der Kirchengestaltung von St. Josef ein wichtiges Werk in der Handschrift des Künstlers vollendet.



Abbildung 11: Enthüllung des Reliefs am 26.11.2017 (Glenz & Meuser 2017)

## Literaturverzeichnis

Deuter, C. 2013: Das Innere zum Äußeren. Publikation zur Ausstellung 27.10.2012-13.1.2013, BASF Schwarzheide GmbH

wikipedia 2019: Authentizität. <https://de.wikipedia.org/wiki/Authentizität%C3%A4t>, abgerufen am 25.2.2019

Steger, W., Schöne, C., Ewald, L., Eißner, U. 2014: Nutzung digitaler Werkzeuge für die Umsetzung eines künstlerischen Entwurfs. In: R. Stelzer (ed.). EEE'2014. Dresden, Deutschland: TUDpress

Glenz, T., Meuser, E. 2017: <https://www.katholisch.de/aktuelles/aktuelle-artikel/warum-dieser-kirchenumbau-50-jahre-dauerte>, 30.11.2017

## Kontakt

Dr.-Ing. Wolfgang Steger, Dr.-Ing. habil. Christine Schöne  
Technische Universität Dresden  
Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion  
01062 Dresden

Dipl.-Ing. Helmut Nitsche  
Gemeinde St. Josef Dresden-Pieschen  
Rehefelder Straße 61

# Das Visionsmodell: Präzise Darstellung von Entwicklungszielen

Laura Augustin, Michael Schabacker

## 1 Einleitung

In jeder Produktentwicklung ist besonders die Abstimmung deren Ziele und Inhalte zu Beginn wichtig. Klare Kommunikation und übereintreffendes Verständnis der Aufgabenstellung legen den Grundstein für eine erfolgreiche Entwicklung. Bisher werden Entwicklungsziele im Maschinenbau hauptsächlich in detaillierten Anforderungslisten (Peschges, 2015), Pflichtenheften und Lastenheften (Bender et al., 2018, Jacoby, 2019) festgehalten, die aufgrund ihres Detaillierungsgrades nicht auf einen Blick erfassbar oder präsentierbar sind. Auch in anderen Branchen gibt es Methoden zur Zieldefinition, die jedoch meist nur Teilaspekte einer Entwicklung abbilden können. Im Industriedesign beispielsweise wird unter anderem mit sogenannten schriftlichen Design Briefs (Rao, 2017) gearbeitet, die die Entwicklungsziele feststecken. Mithilfe des *Visionsmodells* werden verschiedene Herangehensweisen in Kombination mit Erfahrungswissen aus der Industrie zu einer ganzheitlichen und verständlichen Methode verbunden.

## 2 Aktuelles Vorgehen in Maschinenbau und Industriedesign

Die Anforderungsliste ist ein stark detailliertes Dokument aus der Konstruktionslehre, in dem die Entwicklungsziele und die Bedingungen festgehalten werden, unter denen die Ziele erreicht werden sollen (Feldhusen et al 2013). Da eine Anforderungsliste zu Beginn eines Projekts erstellt wird, ist es oft schwierig, schon zu diesem Zeitpunkt detaillierte Angaben zu allen Aspekten

der Entwicklung zu treffen (Feldhusen et al 2013, S. 229). Oft wird die Anforderungsliste dann im weiteren Vorgehen ergänzt, als eine Art offenes Dokument behandelt und daraus später das Lastenheft abgeleitet. Hierbei ist wichtig, dass alle Änderungen auch als solche vermerkt und auch von allen Beteiligten unterzeichnet werden. Zudem führt das prominente Regelwerk auch gern dazu, dass die Vorgaben zu starr befolgt werden (Feldhusen et al., 2013, S. 230). Die Anforderungsliste sollte an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden und nicht anders herum. Gestalterische Details wie Formsprache oder Anmutung eines Produkts werden hier jedoch gänzlich ausgeklammert.

Im Produktdesign wird zur Formulierung von Entwicklungszielen neben einem kurzzeiligen Design Brief oft mit sogenannten Mood Boards (Godlewsky, 2008) gearbeitet. Mood Boards sind Sammlungen von Bildern und Stimmungen, die innerhalb eines Posters zwischen Kunden und Designern emotionale und gestalterische Ausprägungen des zu entwickelnden Produkt kommunizieren (Garner, 2001). Klare Anforderungen lassen sich hieraus jedoch nicht ableiten, lediglich Gestaltungstendenzen oder Wünsche.

Die beschriebenen Herangehensweisen aus Industriedesign und Maschinenbau decken wichtige Aspekte der Zieldefinition zu Beginn einer Produktentwicklung ab, bewegen sich jedoch an unterschiedlichen Enden des Spektrums und überschneiden sich nicht. Die Anforderungsliste beschreibt im Detail, wohingegen das Mood Board und das Design Brief das Projekt als Ganzes umreißen. Eine Lösung aus der Mitte des Spektrums könnte mit geringerer Detaillierung und einem Blick fürs Ganze einen wertvollen Beitrag zur Aufgabendefinition liefern.

### **3 Ziel**

Es besteht also Bedarf nach einer übersichtlichen und verständlichen Methode, welche Aufgabenstellung und Anforderungen präzise und in abgekürzter Form zusammenfasst und zugleich das übergeordnete Ziel kommuniziert. Zudem sollte sie ohne aufwendiges Regelwerk verständlich und universell anwendbar sein.



Im interdisziplinären Entwicklungsumfeld des Masterstudiengangs Integrated Design Engineering an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurde hierzu in Anlehnung an die Struktur des Zielsystems in (Hermann & Huber, 2009, S. 87) und das Vision Statement (Johnson et al., 2018, S.29) das *Visionsmodell* entwickelt.

Dieses dient zur Kommunikation und Abstimmung der Aufgabenstellung innerhalb der regelmäßigen Industrieprojekte, in denen die Studierenden Produktentwicklungsaufgaben durchführen. Nicht zuletzt macht sich auch das Entwicklungsteam die Aufgabe zu eigen, indem sie ein gemeinsames Ziel festlegen. In wenigen Worten wird mit diesem Modell der Inhalt des Entwicklungsprojekts strukturiert wiedergegeben und kann anschließend mit dem Industriepartner diskutiert und abgestimmt werden. Im weiteren Verlauf des Projekts dient es als Entwicklungsgrundlage und Motivation.

## 4 Vorgehen

Das *Visionsmodell* besteht aus den drei Stufen *Vision*, *Fundamentalziel* und *Instrumentalziele*.

Am Kopf des Modells steht eine aussagekräftige *Vision*, die das übergeordnete Unternehmensziel beschreibt. Dieses Ziel muss nicht zwangsläufig erreichbar sein, es dient hauptsächlich der Motivation des Teams und gibt eine allgemeine zukunftsweisende Richtung vor. Die *Vision* steht wie eine Art Werbeslogan über dem Entwicklungsthema. Die Herausforderung liegt hier in einer offenen Formulierung, die trotzdem nicht beliebig wirkt. Erfahrungsgemäß findet hier im Team die größte Reibung statt, bis sich alle mit einer *Vision* identifizieren können.

Das *Fundamentalziel* beschreibt innerhalb eines Satzes oder Satzfragmentes die tatsächliche Aufgabenstellung in präziser und knapper Form. Es handelt sich hierbei um die konkrete Umsetzung der *Vision*, die innerhalb des Projekts durchgeführt werden soll.

Dem untergeordnet stehen die *Instrumentalziele*, die als Teilziele das Erreichen den *Fundamentalziels* ermöglichen. Innerhalb der *Instrumentalziele* werden konkrete und messbare Aussagen getroffen, die vom Entwicklungsteam abgearbeitet werden, um das *Fundamentalziel* zu erreichen. Hierbei liegt die

Herausforderung in der sinnvollen Begrenzung der Aussagen, sodass die *Instrumentalziele* nicht die gesamte Anforderungsliste abbilden. Als Faustregel lässt sich hierbei festlegen, dass innerhalb von drei bis vier Instrumentalzielen je drei Stichpunkte sinnvoll sind.

Das *Visionsmodell* wird somit von der allgemeinen *Vision* bis hin zu den spezifischen *Instrumentalzielen* konkretisiert und bildet so verschiedene Abstraktionsgrade einer Aufgabenstellung ab. Die klare, lineare Struktur unterstützt zudem die Präsentierbarkeit und Verständlichkeit des Modells.

Am Beispiel der Orangenpresse in Abbildung 1 wird der mehrstufige Aufbau des Visionsmodells verdeutlicht. Es lässt sich unabhängig von Entwicklungsinhalt und -ziel auf jede Aufgabenstellung anwenden. Im vorliegenden Fall werden mit der Vision das übergeordnete Hauptziel kommuniziert, eine simple Lösung, mit der Fruchtsaft von der Frucht „direkt ins Glas“ gebracht werden soll. Die Formulierung „direkt“ vermittelt schon, dass das Produkt einfach und schnell zu bedienen sein soll, und bietet so ein klares, aber offenes Ziel.

VISION Übergeordnetes Ziel	Von der Frucht direkt ins Glas		
FUNDAMENTALZIEL Konkrete Aufgabenstellung	Schnelle und einfache Verarbeitung von Orangen zu 100%igem Fruchtsaft in einer mechanischen Orangenpresse		
INSTRUMENTALZIELE Detaillierte Teilziele	Funktion	Design	Komfort
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewinn von 60-70% Saft pro Frucht</li> <li>• Wartungsfrei</li> <li>• Mechanische Saftgewinnung mit minimalem Kraftaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beachtung der Firmen-CI</li> <li>• Selbsterklärend</li> <li>• Verhinderung von Fehlbedienung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergonomische Nutzung der Presse</li> <li>• Max. 3 Handgriffe zum Auslösen der Maschine</li> <li>• Spülmaschinenfest</li> </ul>

Abbildung 1: Beispielhaftes Visionsmodell einer Orangenpresse

Die konkrete Aufgabenstellung beschreibt das Entwicklungsziel, die Entwicklung einer mechanischen Saftpresse für Orangen. Untermuert wird dies von den drei Instrumentalzielen. Diese umfassen im Falle der Orangenpresse die Bereiche Funktion, Design und Komfort. Diese sind abhängig von der jeweiligen Entwicklungsaufgabe und können frei gewählt werden. Es lassen sich nie alle Aspekte einer Entwicklung innerhalb von drei Übergruppen festhalten, jedoch sollten hier schlicht die wichtigsten gewählt werden.

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Mithilfe des *Visionsmodells* werden folglich die wichtigsten Entwicklungsziele beschrieben und übersichtlich visualisiert. Es kann in wenigen Momenten erfasst und verstanden werden und bildet so eine zielführende Gesprächsgrundlage im Austausch mit einem Unternehmenspartner oder zwischen mehreren Abteilungen eines Unternehmens. Das *Visionsmodell* wurde überdies in der Zusammenarbeit mit Industriepartnern wiederkehrend positiv aufgenommen und zum Teil sogar in die internen Prozesse mit aufgenommen, da hier hoher Bedarf nach klaren Kommunikationsformen besteht. Auch die einfache Integration in Präsentationen oder andere Kommunikationszweige aufgrund der Darstellungsform macht das Modell für interne Abläufe interessant.

Eine Herausforderung des Modells bildet die Reduzierung der Inhalte, ohne Aspekte zu vernachlässigen oder zu ungenau zu werden. Das *Visionsmodell* ist zudem nicht so detailliert wie eine Anforderungsliste, ein Pflichten- oder ein Lastenheft und sollte daher als Ergänzung und nicht als Ersatz verstanden werden, da zwangsläufig nicht alle Inhalte innerhalb des Modells dargestellt werden können oder sollten. Eine Anforderungsliste kann ergänzend zur Vervollständigung der Zielstellung parallel geführt werden, sollte die Komplexität der Entwicklungsaufgabe dies verlangen.

Das Erstellen eines *Visionsmodells* steigert des Weiteren Zusammenhalt, Teamgeist und Motivation des Entwicklungsteams (Aubé, Brunelle, Rousseau 2014) und fördert so die weitere Projektarbeit, da die Abstimmung über die Inhalte des Modells zwangsläufig allen Teilnehmern einen Kompromiss abfordert. Die gemeinsam formulierten Inhalte dienen zudem als Motivator, der im Laufe des Entwicklungsprozesses die Arbeit unterstützen kann. Es kann immer wieder als Hilfestellung genutzt werden, um das Entwicklungsziel im Auge zu behalten und zu kontrollieren, ob Entwicklungsergebnisse mit dem Visionsmodell übereinstimmen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit dem *Visionsmodell* eine verständliche und präzise Methode geschaffen wurde, die das Kommunizieren von Entwicklungszielen in wenigen Momenten möglich macht. Sie dient als Ergänzung zu bisherigen Methoden und bildet die fehlende Verbindung zwischen Anforderungsliste und Mood Board.

## Literaturverzeichnis

- Aubé, C., Brunelle, E. & Rousseau, V. 2014: Flow experience and team performance: The role of team goal commitment and information exchange, in: *Motivation and Emotion*, US: Springer
- Arnold, V. et al. 2011: *Product Lifecycle Management beherrschen*, , Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- Bender B., Feldhusen J., Krause D., Beckmann G., Paetzold K., Hövel A. 2018: Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens. In: Grote KH., Bender B., Göhlich D. (eds) *Dubbel*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- Feldhusen J., Grote KH., Nagarajah A., Pahl G., Beitz W., Wartzack S. 2013: Methodisches Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. In: Feldhusen J., Grote KH. (eds) *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg
- Garner, S., McDonagh-Philp, D. 2001: Problem interpretation and resolution via visual stimuli: The use of "mood boards in design education. *Int. J. Art Des. Educ.* 20, 57–64
- Godlewsky T. 2008: Mood Board. In: Erloff M., Marshall T. (eds) *Wörterbuch Design. Board of International Research in Design*. Birkhäuser Basel
- Hermann, A., Huber, F. 2009: Produktstrategie generieren, In: *Produktmanagement*, , Gabler
- Jakoby W. 2019: Projektgründung. In: *Projektmanagement für Ingenieure*. Springer Vieweg, Wiesbaden
- Johnson, G., Whittington, R., Scholes, K., Angwin, D., Regné, P. 2018: *Strategisches Management. Eine Einführung*. (11. Aktualisierte Auflage). Hallbergmoos. Pearson Studium
- Peschges KJ. 2015: Anforderungsliste erstellen (ANFOLI). In: *Im Team entwickeln und konstruieren*. Springer Vieweg, Wiesbaden
- Rao M.N., Onkar P.S., Mathew D.J. 2017: Evolution of Design Briefs: Expressions from Professional Design Practice. In: Chakrabarti A., Chakrabarti D. (eds) *Research into Design for Communities*, Volume 2. ICoRD 2017. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 66. Springer, Singapore

## Kontakt

M.Sc. Laura Augustin  
 Dr.-Ing. Dipl. Math. Michael Schabacker  
 Masterstudiengang Integrated Design Engineering (IDE)  
 Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik  
 Institut für Maschinenkonstruktion  
 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
 Universitätsplatz 2  
 39106 Magdeburg  
[www.ide.de](http://www.ide.de)

# Wissen und Heterogenität in der Produktentwicklung

Alexandra Göhring

Bereits seit einigen Jahrzehnten ist in unserer spätmodernen Gesellschaft eine Transformation zur Wissensgesellschaft zu beobachten (Hebestreit 2013). Das Zukunftsinstitut bezeichnet dies als „Megatrend Wissenskultur“, der für Transparenz, Zugänglichkeit, Demokratie und Dynamik von Wissen steht (Zukunftsinstitut GmbH 2015). Was ein Mensch im Mittelalter im Laufe eines gesamten Lebens an Informationen verarbeitete, können wir heute an einem einzigen Tag einer Tageszeitung entnehmen (Broßmann & Mödinger 2011). Dieses Beispiel verdeutlicht das exponentielle Informations- und Wissenswachstum, das konträrer Weise mit einer drastischen Wissens*abnahme* einhergeht, da unser Wissen immer schneller veraltet (ebd.).

## Produktentwicklung und deren Rahmenbedingungen

Die Produktentwicklung ist einer der wissensintensivsten Prozesse (Binz et al. 2016). Als Wissensarbeit, bei der Wissen in technische Produkte umgesetzt wird (Engeln 2019), wird sie zum Schlüsselfaktor für den Erfolg eines Unternehmens. Neben dem erläuterten Wissenswandel sieht sich die Produktentwicklung mit weiteren gravierenden Rahmenbedingungen Veränderungen konfrontiert.

### Kosten, Zeit und Qualität

Ein vielfach genannter Trend sind die immer kürzeren Produktentwicklungszeiten (Engeln 2011; Lindemann 2005; Reese 2005). Unternehmen und Prozesse müssen schneller und agiler werden (Priddat 2010) und schneller auf die Kundenwünsche reagieren (Spath & Renz 2005).

Auf der anderen Seite steigen die Qualitätsansprüche an das Produkt (Engeln 2011; Lindemann 2005; Spath & Renz 2005). Die Unternehmen sind nicht länger Anbieter von Massenware, sondern reagieren mit ihren Produkten flexibel auf die Wünsche und Anforderungen der Kunden (Priddat 2010). Es ist ein Wandel vom push- zum pull-Prinzip feststellbar. Durch die Individualisierung steigen die Produktvielfalt und die Anzahl an Produktvarianten (Albers 2005; Engeln 2011).

Trotzdem dominieren durch die sinkende Preisbereitschaft der Kunden sinkende Herstellkosten die Produktentwicklung (Engeln 2011), was sich in geringeren Entwicklungsbudgets niederschlägt (Spath & Renz 2005). Dem gegenüber stehen explosionsartig steigende F&E-Kosten durch die komplexen und dynamischen Rahmenbedingungen, wodurch insgesamt das Risiko in der Produktentwicklung steigt (Albers & Gassmann 2005).

Kurzum muss in der Produktentwicklung in immer kürzerer Zeit mit immer weniger Kosten eine immer bessere Qualität geliefert werden. Die Produktentwicklung im Kontext der Wissenskultur wird hierbei sowohl in Bezug auf die Produkte und Systeme als auch auf die dabei eingesetzten Prozesse immer komplexer (Ehrlenspiel & Meerkamm 2013; Lindemann 2005; Reese 2005). Das bedeutet, dass Informationen und Sachverhalte nicht (mehr) isoliert voneinander gesehen werden können, sondern vielfach miteinander netzwerkartig verknüpft sind (N. Bennett & G. J. Lemoine 2014).

### VUCA-Welt

VUCA setzt sich aus den Begriffen *volatility* (Volatilität), *uncertainty* (Unsicherheit), *complexity* (Komplexität) und *ambiguity* (Ambiguität) zusammen und beschreibt den aktuellen Zeitgeist, sowohl im gesellschaftlichen als auch im unternehmerischen Kontext (N. Bennett & J. Lemoine 2014). Die „VUCA“-Rahmenbedingungen erfordern von den Unternehmen Schnelligkeit und Flexibilität sowie eine Beherrschung der Komplexität und die Akzeptanz von Ambivalenz (Engeln 2019). Um Unsicherheit zu verringern ist Wissen entscheidend, mit dem neue Perspektiven beleuchtet werden können (N. Bennett & G. J. Lemoine 2014). Wachsende Komplexität ist nur durch eine ausreichende Wissensbreite beherrschbar (ebd.).

## Notwendigkeit von Interdisziplinarität

Durch die enorme Komplexität ist es nicht (mehr) möglich, Produkte innerhalb einer Disziplin zu entwickeln. Eine interdisziplinäre Herangehensweise, in der viele Fachbereiche und Wissenschaftsgebiete eng verzahnt zusammenarbeiten, ist zwingend (Albers & Gassmann 2005; Richtlinie VDI 2221). Lindemann (2005) schreibt hierzu: **„Die Welt der Technik in Verbindung mit den Märkten ist inzwischen so komplex geworden, dass niemals eine Einzelperson alle erforderlichen Facetten ausfüllen kann.“** (S. 297)

Nur durch die Zusammenarbeit der Bereiche Entwicklung, Design, Produktion, Marketing, Vertrieb, Einkauf und Controlling gelingt es, ein Produkt erfolgreich zu entwickeln (Engeln 2011). Durch Interdisziplinarität wird es möglich, trotz hoher Komplexität disziplinäre Lücken aufzudecken und durch unterschiedliche Sichtweisen zu schließen (Lerch 2017).

Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Zusammenarbeit von Ingenieuren und Industriedesignern zu (Feldhusen & Grote 2013; Lindemann 2005). Ohne die enge Zusammenarbeit zwischen Technik und strategisch ausgerichtetem Design sind technische Innovationen nicht mehr denkbar (Reese 2005). Ingenieure und Industriedesigner bestimmen gemeinsam maßgeblich die technischen Eigenschaften des Produkts und legen durch die Gestaltung einen Großteil der Produkt- und Produktionseigenschaften bzw. -kosten fest (Ehrlenspiel et al. 2014).

Auch der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) unterstreicht in der erneuerten Richtlinie 2221 zur Entwicklung technischer Produkte und Systeme die wichtige Rolle der Interdisziplinarität und des Industriedesigns in der technischen Produktentwicklung. Ergänzend zu den technisch-wirtschaftlichen Zielen berücksichtigt Design auch soziale, psychische und physische Bedürfnisse der Kunden und Nutzer (Richtlinie VDI 2221).

Um also das Spannungsfeld aus Kosten, Zeit und Qualität in der Produktentwicklung trotz VUCA in Balance zu bringen und sowohl der Wünschbarkeit durch die Kunden als auch der Wirtschaftlichkeit im Unternehmen und der technologischen Machbarkeit Hinsicht gerecht zu werden (Brown 2011), setzt die Produktentwicklung auf Heterogenität.

## Heterogenität

Heterogenität heißt wörtlich aus dem Altgriechischen übersetzt „andere/verschiedene Art“. Sie beschreibt, wie sehr sich die sichtbaren (bspw. Geschlecht, Alter) sowie unsichtbaren Merkmale (bspw. Ausbildung, Fachwissen) der Individuen einer Gruppe unterscheiden (Jehn et al. 1997; Joshi & Jackson 2003). Diese Merkmale sind entweder aufgaben- oder beziehungsorientiert (Joshi & Jackson 2003; Pelled et al. 1999).

Die Begriffe Heterogenität und Diversity werden meist synonym verwendet. Sie sind kaum klar voneinander abzugrenzen und konnten sich in unterschiedlichen Wissenschaftsdiskursen über Verschiedenheit unterschiedlich stark durchsetzen (Meyer 2017). Da der Begriff „Diversity“ in politischen Debatten und auch im Unternehmenskontext vor allem mit demographischen Faktoren wie Gender, Kultur, Ethnie oder sexueller Orientierung konnotiert ist (Amstutz & Müller 2013), wird in dieser Forschungsarbeit der neutralere Begriff „Heterogenität“ verwendet.

Aus unternehmerischer Sicht tritt Heterogenität in vier Schichten auf (s. Abbildung 1), die vom Unternehmen unterschiedlich stark beeinflusst werden können (Gardenswartz & Rowe 2008).

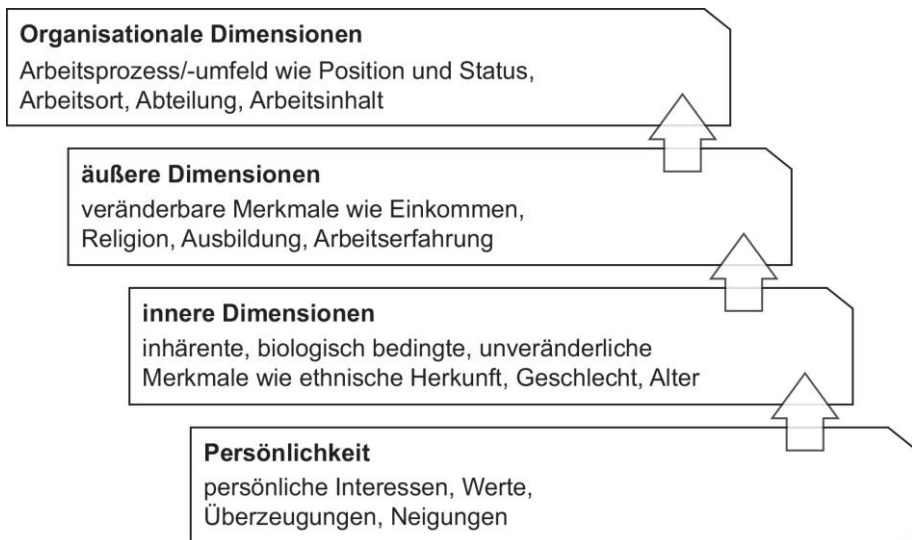


Abbildung 1: Heterogenität im Unternehmenskontext (nach Gardenswartz & Rowe 2008)



Die für die Zusammenarbeit von Technik und Design relevanten Faktoren finden sich in der äußeren oder organisationalen Dimension und umfassen Merkmale wie Ausbildung, Erfahrung, Fähigkeiten und Fachwissen (Lindemann, 2005). Sie sind meist unsichtbar und aufgabenbezogen.

### Heterogenität in der interdisziplinären Produktentwicklung

Welche Aussagen können nun grundsätzlich über die Zusammenarbeit in heterogenen Produktentwicklungsteams getroffen werden?

Heterogene Gruppen besitzen erwartungsgemäß eine größere Wissens- und Erfahrungsbreite. Daher kann Heterogenität für Aufgaben wie Innovationen oder Produktgestaltung generell profitabel sein, da dort verschiedene Perspektiven, Fähigkeiten und vielfältiges Wissen förderlich sind (Williams & O'Reilly 1998). Dies äußert sich vor allem in einer verbesserten Problemlösung, mehr Kreativitätspotenzial und Flexibilität bei der Lösungssuche (Comelli et al. 2014; Williams & O'Reilly 1998). Positive Effekte, die durch Heterogenität entstehen, nehmen im Laufe der Zeit jedoch ab, da sich das Team bei wiederholter Zusammenarbeit homogenisiert (Smith & Hou 2015).

Im Produktentwicklungskontext entstehen durch Interdisziplinarität jedoch auch enorme Probleme in der Kommunikation und Kooperation (Gebert 2004). Diese Barrieren egalisieren oft den positiven Effekt, sodass sich funktionale Heterogenität negativ oder zumindest nicht immer signifikant positiv auf die Teaminnovativität auswirkt (Gebert 2004). Die Team-Performance sinkt (Ancona & Caldwell 1992) und es treten Probleme bei der Integration des Teilwissens der Teammitglieder auf (Steinheider & Legrady 2001).

Es gibt daher empirische Befunde, die darauf hinweisen, dass eine *homogene* Zusammensetzung den Gruppenprozess und die Gruppenleistung verbessert (Williams & O'Reilly 1998). Homogenität schafft Gemeinsamkeiten und sorgt für Stabilität, gute Beziehungen, ähnliche Denkweisen und eine einfache, fehlerfreiere Kommunikation (Comelli et al. 2014). Je größer die Überlapung von Gemeinsamkeiten ist, umso besser kann die Kommunikation losgelöst von Fachgebieten funktionieren (Kaufmann 1987).

Homogenität kann aber auch dazu führen, dass Wahrnehmung und Handeln nur selektiv stattfinden und auf Konsens fixiert sind. Dadurch entsteht eine gewisse Blockade gegenüber außenstehenden Personen oder Ideen (Comelli

et al. 2014) und eine „selektive Exposition“ bei der Informationssuche (Fischer et al. 2005). Es werden vorwiegend Informationen beschafft, die im Einklang mit den Team-Entscheidungen stehen. Zudem geht durch „Groupthink“ das kritische Denken zurück (Janis 1971). Der Drang nach Konformität wird so stark, dass alternative Handlungen und Lösungen nicht mehr realistisch eingeschätzt und Meinungen nicht mehr kritisch hinterfragt werden (ebd.).

Heterogenität im Team ist daher ein ambivalentes, U-förmiges Konstrukt, bei dem entweder die Vorteile oder die Nachteile der heterogenen Team-Zusammensetzung überwiegen oder diese sich egalisieren (Williams & O'Reilly 1998). Außerdem wirken sich unterschiedliche Heterogenitäts-Merkmale unterschiedlich auf das Team aus und können daher nicht verallgemeinert werden (Webber & Donahue 2016).

## **Heterogenität und Wissen**

Einerseits ist es also unabdingbar, dass die unterschiedlichen Disziplinen Technik und Design während der Produktentwicklung zusammenarbeiten, andererseits kann Interdisziplinarität aber auch hinderlich sein. Es stellt sich daher die Frage, wie sich Heterogenität in der wissensintensiven Zusammenarbeit von Technik und Design äußert.

Wissen ist immer kontextbezogen und vor allem personenabhängig (North et al. 2016). Gerade im Zusammenhang mit der Digitalisierung, die Routineaufgaben verstärkt automatisiert, werden menschliche Fähigkeiten und persönliches Wissen immer wichtiger (Zukunftsinstitut GmbH 2015). Personen als Wissens- und Erfahrungsträger spielen eine zentrale Rolle, denn schon die Zusammenstellung des Teams entscheidet maßgeblich über das Wissensprofil des Projekt-Teams.

### **Implizites und Explizites Wissen**

Wissen kann sowohl implizit als auch explizit vorliegen (Binz et al. 2016; Nonaka & Takeuchi 1995; North et al. 2016). Im Vordergrund der technischen Lösungen im Wissensmanagement steht meist das explizite Wissen. Hierunter versteht man artikuliertes bzw. dokumentiertes Wissen, das durch geeignete Werkzeuge erfasst und einfach zwischen mehreren Personen ausgetauscht werden kann (Nonaka & Konno 2005; North et al., 2016).

Implizites Wissen hingegen ist unausgesprochen und dadurch nicht so einfach kommunizierbar (Nonaka & Konno 2005; North et al. 2016). Es umfasst technische Aspekte wie Fertigkeiten und Fähigkeiten sowie kognitive Aspekte wie Werte, Überzeugungen und Denkmuster (Nonaka & Konno 2005), die sehr schwer systematisch auszutauschen sind, insbesondere über Abteilungsgrenzen hinweg (Orth, et al. 2008). Sie bestimmen jedoch maßgeblich unsere Art zu denken und zu handeln. Bei Produktentwicklern ist vor allem das implizite Erfahrungswissen wichtig, da mit ihm intuitiv Konstruktions- und Gestaltungsentscheidungen getroffen werden können. Insbesondere Designwissen ist größtenteils implizit und stark subjektiv geprägt (Wölfel 2012).

Neues implizites Wissen kann aber nur entstehen, wenn es als explizites Wissen in die Umwelt getragen und durch Erfahrungen und Anwendung sozialisiert wird (Nonaka & Takeuchi 1995). Für den Austausch impliziten Wissens bedarf es daher einer intensiven Kommunikation und Kooperation der Beteiligten, denen eine gemeinsame Wissensbasis zugrunde liegen muss.

#### Wissenstiefe, Wissensbreite und Metawissen

Durch die erläuterte Komplexität und den Zeit-, Kosten- sowie Qualitätsdruck in der Produktentwicklung reicht es nicht mehr aus, einzelne Spezialisten in einem sequentiellen Prozess hintereinanderschalten. Stattdessen bildet, wie in Abbildung 2 dargestellt, das simultan angewendete Wissen der Individuen ein interdisziplinäres Team-Wissen, mit dem die Produktentwicklung bewältigt werden kann (Schlattmann & Seibel 2017b).

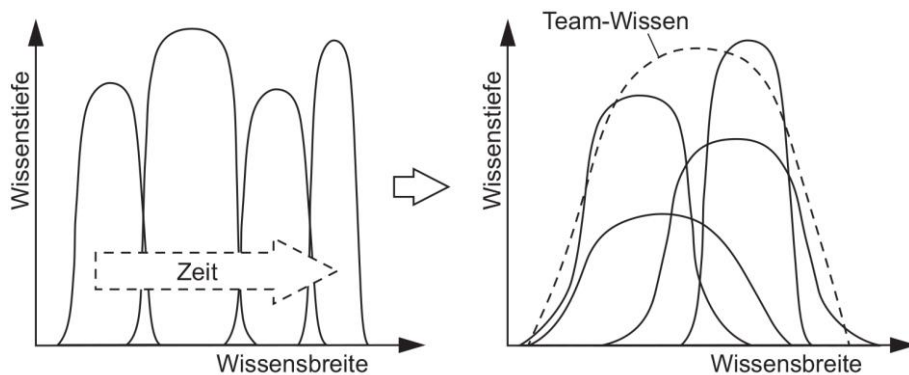


Abbildung 2 Simultanes Team-Wissen (rechts) ersetzt sequentielles Spezialisten-Wissen (links) (in Anlehnung an Schlattmann & Seibel 2017b)

Die Teammitglieder besitzen unterschiedliche Wissensbreiten und –tiefen. Es sind sowohl Fachspezialisten der einzelnen Disziplinen als auch Generalisten mit interdisziplinärem Wissen gefordert, um die zunehmend geforderte Wissensbreite und –tiefe der innerbetrieblichen Arbeitsstruktur abzudecken (Engeln 2019; Schlattmann & Seibel 2017a; Schnauffer et al. 2004). Je mehr Metawissen, also Wissen über Wissen, bei den einzelnen Fachvertretern vorhanden ist, umso besser ist auch die Vernetzungsfähigkeit (Herrmann et al. 2003; Schnauffer et al. 2004).

### Forschungsbedarf und Ausblick

Ein Großteil der vorhandenen Forschung behandelt die Zusammenarbeit von Designern und Ingenieuren in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dort stehen vor allem Anforderungs- und Kundenwissen im Vordergrund. Die vorliegende Forschungsarbeit legt den Schwerpunkt hingegen auf die Entwurfs- und Gestaltungsphase, in der die Lösungskonzepte in ein technisches System umgesetzt, und getestet werden. Ingenieure und Industriedesigner bringen dazu ihr Fach-, Methoden- und Produktwissen im Produktentwicklungsprozess ein (Binz et al. 2016), um das Produkt zu gestalten und zur Marktreife zu bringen.

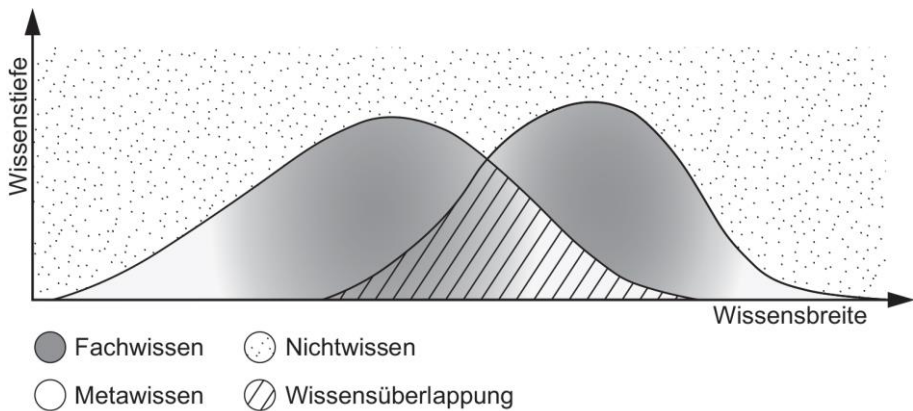


Abbildung 3: Überlappung von Wissensprofilen (in Anlehnung an Schlattmann & Seibel 2017a; Schnauffer et al. 2004)

Die Frage ist nun, wie heterogen oder homogen die Wissensprofile in Bezug auf das Produkt- und Umsetzungswissen von Ingenieuren und Designern aufgestellt und durch Überlappungen und Metawissen miteinander verbunden sein müssen (s. Abbildung 3), um die Wissensheterogenität gewinnbringend und möglichst barrierefrei zu nutzen.

Die Vermutung ist: Je größer die Überlappungen von Wissen ist, umso besser kann eine von Spezialgebieten losgelöste Kommunikation funktionieren und umso weniger treten Kommunikationsbarrieren und Probleme bei der Wissensintegration auf. Je mehr sich das Wissen jedoch mit der Zeit durch den Homogenisierungseffekt angleicht, umso mehr egalisieren sich die positiven Effekte in Bezug auf Problemlösung und Kreativitätspotenzial und Gruppeneffekte wie „Groupthink“ und „selektive Exposition“ nehmen zu. Es muss also eine Balance zwischen Wissensheterogenität und Wissenshomogenität gefunden werden, die auch längerfristig methodisch aufrechterhalten werden kann.

Das Projekt befindet sich aktuell in der Recherchephase, in der durch Literaturrecherchen und Experteninterviews die Forschungsgrundlagen sowie der aktuelle Forschungsstand ermittelt werden. Die Grundlagen sollen anschließend in ein Arbeitsmodell überführt und dessen Relevanz empirisch mit industriellen Vertretern aus der Produktentwicklung verifiziert werden.

## Literaturverzeichnis

- Albers, S. & Gassmann, O. (Hrsg.) 2005: Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Strategie - Umsetzung - Controlling. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Amstutz, N. & Müller, C. 2013: Diversity Management. In Steiger, T. & Lippmann, E. (Hrsg.): Handbuch angewandte Psychologie für Führungskräfte. Führungskompetenz und Führungswissen, 4., vollst. und überarb. Aufl., Bd. 2, 359-380. Berlin: Springer.
- Ancona, D. G. & Caldwell, D. F. 1992: Cross-Functional Teams: Blessing or Curse for New Product Development? In Kochan, T. A., Useem, M., Thurow, L. C. & Useem, T. (Hrsg.): Transforming Organizations, 154-168. Oxford University Press.
- Bennett, N. & Lemoine, G. J. 2014: What a difference a word makes. Understanding threats to performance in a VUCA world. Business Horizons, 57 (3), 311-317.
- Bennett, N. & Lemoine, J. 2014: What VUCA really means for you. Harvard Business Review, 92 (1/2), 27.
- Binz, H., Roth, D. & Laukemann, A. 2016: Wissensmanagement. In Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung, 247-274. München: Hanser.

- Broßmann, M. & Mödinger, W. 2011: Managen von Wissen als eigenständige Disziplin? In Broßmann, M. & Mödinger, W. (Hrsg.): Praxisguide Wissensmanagement. Qualifizieren in Gegenwart und Zukunft. Planung, Umsetzung und Controlling in Unternehmen, X.media.press, 3-8. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Brown, T. 2011: Change by design: how design thinking transforms organizations and inspires innovation, 1. Aufl. New York NY: Harper Business.
- Comelli, G., Rosenstiel, L. & Nerdinger, F. W. 2014: Führung durch Motivation. Mitarbeiter für die Ziele des Unternehmens gewinnen. München: Vahlen.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. 2014: Kostenverantwortung der Produktentwickler. In Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U. & Mörtl, M. (Hrsg.): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, 7-20. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. 2013: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser.
- Engeln, W. 2011: Methoden der Produktentwicklung. 2. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverlag.
- Engeln, W. 2019: Produktentwicklung. Herausforderungen, Organisation, Prozesse, Methoden und Projekte. Essen: Vulkan Verlag.
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (Hrsg.) 2013: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, 8., vollständig überarbeitete Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- Fischer, P., Jonas, E., Frey, D. & Schulz-Hardt, S. 2005: Selective exposure to information. The impact of information limits. *European Journal of Social Psychology*, 35 (4), 469-492.
- Gardenswartz, L. & Rowe, A. 2008: Diverse teams at work. Capitalizing on the power of diversity. Alexandria, Va.: Society for Human Resource Management.
- Gebert, D. 2004: Durch diversity zu mehr Teaminnovativität? Ein vorläufiges Resümee der empirischen Forschung sowie Konsequenzen für das diversity Management. *Die Betriebswirtschaft*, 64 (4), 412-430.
- Hebestreit, R. 2013: Partizipation in der Wissensgesellschaft. Funktion und Bedeutung diskursiver Beteiligungsverfahren. Studien der NRW School of Governance. Wiesbaden: Springer VS.
- Herrmann, T., Kienle, A. & Reiband, N. 2003: Metawissen als Voraussetzung für den Wissensaustausch und die Kooperation beim Wissensmanagement. *Zeitschrift für Medienpsychologie*, 15 (1), 3-12.
- Janis, I. L. 1971: Groupthink. *Psychology today*, 5 (6), 43-46.
- Jehn, K. A., Chadwick, C. & Thatcher, S. M. B. 1997: To agree or not to agree: The effects of value congruence, individual demographic dissimilarity, and conflict on workgroup outcomes. *International Journal of Conflict Management*, 8 (4), 287-305.

- Joshi, A. & Jackson, S. E. 2003: Managing workforce diversity to enhance cooperation in organizations. In West, M. A., Tjosvold, D. & Smith, K. G. (Hrsg.): *International Handbook of Organizational Teamwork and Cooperative Working*, 277-296. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Kaufmann, F.-X. 1987: Interdisziplinäre Wissenschaftspraxis. Erfahrungen und Kriterien. In Kocka, J. (Hrsg.): *Interdisziplinarität. Praxis, Herausforderung, Ideologie*, Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, Bd. 671, 63-81. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Lerch, S. 2017: *Interdisziplinäre Kompetenzen. Eine Einführung. utb Schlüsselkompetenzen*. Stuttgart: UTB GmbH.
- Lindemann, U. 2005: Der Ingenieur und seine Designer — oder der Ingenieur und seine Partner? In Reese, J. (Hrsg.): *Der Ingenieur und seine Designer. Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design*, VDI-Buch, 297-307. Berlin: Springer.
- Meyer, S. 2017: *Soziale Differenz in Bildungsplänen für die Kindertagesbetreuung. Eine diskursiv gerahmte Dokumentenanalyse*: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Nonaka, I. & Takeuchi, H. 1995: *The Knowledge-creating Company. How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*: Oxford University Press.
- Nonaka, I. & Konno, N. 2005: Knowledge Creation. *Knowledge Management: Critical Perspectives on Business and Management*, 2 (3), 53.
- North, K., Brandner, A. & Steininger, T. 2016: Die Wissenstreppe. Information – Wissen – Kompetenz. In North, K., Brandner, A. & Steininger, T. (Hrsg.): *Wissensmanagement für Qualitätsmanager. Erfüllung der Anforderungen nach ISO 9001:2015. essentials*, 5-8. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Orth, R., Finke, I. & Voigt, S. 2008: *Wissen greifbar machen: Den Umgang mit Wissen beschreiben und bewerten*. ProWis-Projektstudie Nr. 2. Berlin, Magdeburg.
- Pelled, L. H., Eisenhardt, K. M. & Xin, K. R. 1999: Exploring the Black Box. An Analysis of Work Group Diversity, Conflict, and Performance. *Administrative Science Quarterly*, 44 (1), 1.
- Priddat, B. P. 2010: *Organisation als Kooperation*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
- Probst, G. J. B., Raub, S. P. & Romhardt, K. 2012: *Wissen managen. Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*, 7. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Reese, J. (Hrsg.). 2005: *Der Ingenieur und seine Designer. Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design*. VDI-Buch. Berlin: Springer.
- Schlattmann, J. & Seibel, A. 2017a: Erfolgreiche Teamarbeit im Entwicklungsprojekt. In Schlattmann, J. & Seibel, A. (Hrsg.): *Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten*. Springer Reference Technik, 147-161. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schlattmann, J. & Seibel, A. 2017b: Organisation eines Entwicklungsbereichs. In Schlattmann, J. & Seibel, A. (Hrsg.): *Aufbau und Organisation von Entwicklungsprojekten*. Springer Reference Technik, 147-161. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Schnauffer, H.-G., Staiger, M., Voigt, S. & Reinhardt, K. 2004: Die Hypertext-Organisation - Ansatz und Gestaltungsmöglichkeiten. In Schnauffer, H.-G., Stieler-Lorenz, B., Peters, S. & Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Wissen vernetzen. Wissensmanagement in der Produktentwicklung, 12-45. Berlin: Springer.
- Smith, E. B. & Hou, Y. 2015: Redundant Heterogeneity and Group Performance. *Organization Science*, 26 (1), 37-51.
- Spath, D. & Renz, K.-C. 2005: Technologiemanagement. In Albers, S. & Gassmann, O. (Hrsg.): Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Strategie - Umsetzung – Controlling, 229-246. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Steinheider, B. & Legrady, G. 2001: Kooperation in interdisziplinären Teams in Forschung, Produktentwicklung und Kunst. In Oberquelle, H., Oppermann, R. & Krause, J. (Hrsg.): Mensch & Computer 2001. Berichte des German Chapter of the ACM. Bd. 55, 37-46. Stuttgart: Vieweg+Teubner Verlag.
- VDI 2221, Blatt 1 2019: Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung. Berlin: Beuth Verlag.
- Webber, S. S. & Donahue, L. M. 2016: Impact of highly and less job-related diversity on work group cohesion and performance. A meta-analysis. *Journal of Management*, 27 (2), 141-162.
- Williams, K. Y. & O'Reilly, C. A. 1998: Demography and Diversity in Organizations: A Review of 40 Years of Research. In Staw, B. M. & Cummings, L. L. (Hrsg.): Research in organizational behavior. An annual series of analytical essays and critical reviews, Volume 20, 77-140. Greenwich, CT: JAI Press.
- Wölfel, C. 2012: Designwissen. Spezifik und Unterstützung der Akquise durch reflexive und narrative Methoden. Technisches Design, Bd. 7. Dresden: TUDpress Verlag der Wissenschaften Dresden
- Zukunftsinstitut GmbH 2015: Megatrend Wissenskultur. In Zukunftsinstitut GmbH (Hrsg.): Megatrend Dokumentation: die Wegweiser des Wandels. Frankfurt am Main.

## Kontakt

Alexandra Göhring M.Sc.  
 HEED – Institute for Human Engineering &  
 Empathic Design | Hochschule Pforzheim  
 Tiefenbronner Str. 65  
 75175 Pforzheim  
[www.hs-pforzheim.de/heed](http://www.hs-pforzheim.de/heed)



# Kombination der experimentellen und numerischen Simulation zur Entwicklung dreidimensionaler Elektronik

Florian Schaller, Fabian Kayatz und Cedric Sanjon

## Einleitung

Immer mehr Produkte des alltäglichen Lebens besitzen elektronische Funktionalitäten durch Beleuchtungselemente, Speicher und Displays. Aufgrund der Positionierung im Massenmarkt werden häufig zweidimensionale Leiterplatten verwendet, die schnell und effektiv bestückt werden können. In der Folge ist die Freiheit der Formgebung allerdings stark eingeschränkt. Ein vielversprechender Ansatz ist die Umsetzung dreidimensionaler Elektronik.

Eine bekannte Alternative sind 3D-MIDs (3D Molded Interconnect Devices). Bei den klassischen MID-Herstellungsverfahren werden spritzgegossene dreidimensionale Formteile hergestellt (Franke 2013). Anschließend erfolgt die Bedruckung von Leiterbahnen und bspw. die Bestückung von einfachen SMD-Bauteilen (Surface-Mounted Device). Die so entstehende dreidimensionale Elektronik ermöglicht die Umsetzung neuer Funktionen z.B. in der Sensorik oder Aktorik bei gleichzeitig reduziertem Gewicht (Orlob et al. 2009). Damit sind sie insbesondere für den Leichtbau in der Automobil- und Luftfahrtindustrie geeignet. Die Entwicklung entsprechender Fertigungsverfahren, -technologien und -linien ist derzeit der Fokus zahlreicher Forschungen. Da diese Verfahren technisch aufwendig und teilweise nicht vollständig automatisiert sind (Schierbaum 2017), bleibt die Hauptherausforderung einer breiten Anwendung weiterhin bestehen. Konventionell hergestellte dreidimensionale Elektronik ist aufgrund der hohen Kosten sowie der geringen Produktionsgeschwindigkeit nicht massenproduktionstauglich, was insbesondere in der Elektronikbranche eine grundlegende Voraussetzung darstellt. Ein breiter Einsatz ist damit eingeschränkt.

Einen neuen Ansatz bietet das Thema Conformable Electronics. Im Gegensatz zu dem 3D-MID-Verfahren wird die Bedruckung und Bestückung konventionell im planaren Zustand durchgeführt. Erst in einem letzten Schritt erfolgt die Formgebung. Auf diesem Weg soll eine kostengünstige Herstellung von dreidimensionaler Elektronik ermöglicht werden.

Im Folgenden wird die Vision eines Produktionsprozesses von dreidimensionaler Elektronik in großen Stückzahlen mit dem Fokus auf die Formgebung vorgestellt. Im Anschluss wird die Methode zur Entwicklung von Designs und der damit verbundenen Auswahl von Materialien erläutert. Eine große Bedeutung hat die Kombination der experimentellen und numerischen Simulation inne. Abschließend wird beispielhaft dargestellt, wie zukünftig eine Auslegung von Conformable Electronics erfolgen kann.

## **Produktionsprozess**

Wie bei der Leiterplattenherstellung bildet bei den Conformable Electronics ein plattenförmiges und elektrisch isolierendes Material, kurz Trägermaterial, die Grundlage des Produktionsprozesses. Aus diesem Grund können im Gegensatz zum 3D-MID-Verfahren konventionelle Techniken der Leiterplattenindustrie genutzt werden. Die Bedruckung der Leiterbahnen erfolgt über den Siebdruck. Verwendet werden leitfähige dehnbare Pasten wie z.B. Pasten auf Basis von Silber oder Polymer. Für die Bestückung der Bauelemente werden die auf hohe Geschwindigkeiten optimierten Bestückungsautomaten eingesetzt, die nach dem Pick & Place Prinzip arbeiten. Für die Formgebung der Trägermaterialien werden die vorhandene Technologien aus dem Bereich der Verpackungstechnik transferiert, da diese auf eine kostengünstige und schnelle Produktion spezialisiert sind. In diesem Hinblick bietet sich der Thermoformprozess an.

Der Begriff Thermoformen beschreibt das Umformen von thermoplastischen Substraten zu einem Formteil mit dreidimensionaler Geometrie (Liebig 2008). Das Substrat wird vor der Formgebung mit einer Strahlungs-, Kontakt- oder Konvektionsheizung auf die für den Prozess benötigte Umformtemperatur erwärmt, damit eine Umformung unter Kraftaufwand möglich ist (Schwarzmann 1997). Das erwärmte Halbzeug wird nach Erreichen der Umformtemperatur unter Einsatz von Luftdruck, Vakuum und mechanischen Hilfen sowie Kombinationen aus diesen Elementen umgeformt (Throne

1996). Durch die einwirkenden Kräfte kommt es zu einer Längenänderung, wodurch sich die Wanddicke des Substrats im lokalen Bereich verringert (Schwarzmann 1997). Für die Formgebung werden Formwerkzeuge verwendet, die sich, abhängig von dem Thermoformverfahren, in ihrer Form und Funktion unterscheiden. Die Umformung ist abgeschlossen, wenn das Halbzeug die Konturen des Formwerkzeugs abbildet bzw. wenn die maximale Dehnung erreicht wird. Bei der Abkühlung des Formteils wird ein formstabiler Zustand erreicht (Engelmann 2012).

Durch die Adaption des Thermoformens und der Techniken aus der Leiterplattenindustrie erfolgt in dem Anwendungsfall die Herstellung von dreidimensionaler Elektronik mittels der im Folgenden aufgezählten Bearbeitungsschritte.

1. Elektrisch leitende Verbindungen auf das thermoplastische Trägermaterial drucken
2. Bedrucktes Trägersubstrat bestücken, Bauteile fixieren
3. Das Trägersubstrat hinsichtlich der zu formenden Bereiche lokal erwärmen
4. Umformung des Trägersubstrats in die gewünschte Geometrie  
Vereinzeln der dreidimensionalen Elektronik

Zur Veranschaulichung ist auf Abbildung 1 eine Prinzipskizze des Vorhabens dargestellt.

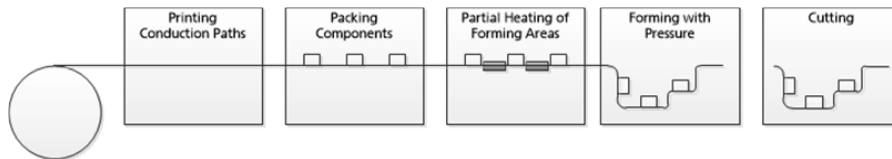


Abbildung 1: Schematischer Prozessablauf

## Entwicklung der Conformable Electronics

### Fragestellung

Die beschriebene Produktionsidee und die neuartige Kombination bisher getrennter Fertigungsverfahren erfordert eine Neubewertung einsetzbarer Materialien, Technologien und Prozessgrenzen. So schränkt beispielsweise die

thermische Belastung während des Bedruckungs-, Trocknungs- und Umformprozesses die einsetzbaren Trägersubstrate ein. Das sogenannte 'Curing' findet bei einer Umgebungstemperatur von ca. 100°C bei einer Dauer von 10 min statt. In diesem Temperaturbereich weisen zahlreiche für das Thermoformen eingesetzte und für die Herstellung von dreidimensionaler Elektronik in Frage kommende Materialien ein viskoelastisches und plastisches Verhalten auf.

Neben den Prozessparametern und der Materialauswahl ist der Formfaktor durch die gedruckten, dehnbaren Pasten und der Positionierung der Bauteile determiniert. Die Zielgröße ist in diesem Fall die lokale Verstreckung der Materialien, welche simulativ bestimmt werden kann. Voraussetzung ist eine bereits durchgeführte Charakterisierung des Trägersubstrats. Unbekannt sind die Grenzen der Leiterbahnen hinsichtlich der maximal möglichen Dehnung. Mit steigender Verstreckung verschlechtert sich die Leitfähigkeit der Pasten zunehmend. Bei einer Überschreitung der möglichen Dehnrate ist die Leitfähigkeit im Material nicht mehr gegeben. Beim Hersteller erfolgt die Charakterisierung mittels eines uniaxialen Zugversuchs. Der Realbezug zum Thermoformen muss angezweifelt werden, da die auftretenden biaxialen Dehnungen bei einem uniaxialen Zugversuch nicht berücksichtigt werden. Ferner sind die erreichten Dehngeschwindigkeiten deutlich geringer und die schlagartige Abkühlung der Materialien, die beim Thermoformen auftritt, wird ebenfalls nicht abgebildet. Ein weiteres Problem ist die auftretende Querschnittsverjüngung infolge der uniaxialen Zugbelastung beim einfachen Zugversuch.

Damit eine Aussage über mögliche Verstreckverhältnisse der Pasten getroffen werden kann, werden Ersatzmethoden unter Beachtung eines Realbezugs zum Thermoformen durchgeführt. Erst durch die Kombination der numerischen und experimentellen Simulation ist eine endgültige Aussage über die technischen Grenzen der dreidimensionalen Elektronik in Hinblick auf das Design möglich.

### Ersatzmethoden für die Untersuchung der Materialeigenschaften

Die Grundlage für die Bestimmung der Grenzen des Designs ist ein definiertes Testobjekt inklusive Testsubstrat, mit dem die Produktparameter der

dreidimensionalen Elektronik bezüglich der auftretenden Verstreckverhältnisse untersucht werden. Neben einer Untersuchung der wichtigsten Prozessparameter und kritischer Formteilgeometrien steht der Vergleich verschiedener Trägersubstrate und Pasten im Mittelpunkt. In Hinblick auf eine möglichst effiziente Versuchsplanung und einem reduzierten Versuchsaufwand werden mit jedem Umformversuch möglichst viele Einflussgrößen abgebildet. Die Basis bildet ein für den Thermoformprozess optimierter Streck- bzw. Zugversuch. Im Gegensatz zu einem klassischen uniaxialen Zugversuch wird ein Stempel verwendet, der das erwärmte Material verstreckt. Bedingt durch die Geometrie des Stempels kann eine Querschnittsverjüngung infolge der Zugbelastung vermieden werden. Neben der Stempelverstreckung sind in dem Testobjekt klassische Thermoformversuche integriert. Die Trennung der Funktionsbereiche gewährleistet, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Ersatzmethoden ausgeschlossen ist.

Mit Hilfe der numerischen Simulation erfolgt eine quantitative Zuordnung der geometrischen Daten. Entsprechend der Funktionsteile wird jeweils ein Simulationsmodell für die beschriebenen Ersatzmethoden erstellt. Unterschiedliche Heizmethoden, wie die Erwärmung über Konvektion (Strahler) oder Konduktion (Kontaktheizer) sowie die Kombination beider Varianten, können ebenso wie ein homogenes bzw. inhomogenes Temperaturfeld berücksichtigt werden. Ausgehend von einer vorangestellten Materialcharakterisierung des Trägermaterials erfolgt eine dem Anwendungsfall zugeordnete Bestimmung der lokalen Verstreckung. Die Thermoformversuche sind so ausgelegt, dass z.T. unabhängig von der Geometrie die gleichen Verstreckverhältnisse realisiert werden. Neben unterschiedlicher Umformgeschwindigkeiten können so Formfaktoren, wie bspw. der Einfluss unterschiedlicher Radien und Formschrägen, untersucht werden. Bei den Stempelverstreckungen wird simulativ der notwendige Verfahrensweg ermittelt, damit sich in der experimentellen Versuchsdurchführung die gewünschte Dehnung im Material einstellt. Ein Abgleich zwischen Simulation und Experiment erfolgt über die optische Auswertung von Dehnungsmarkierungen.

Ausgehend von der Geometrie des Testobjekts wurde ein Testsubstrat mit definierten Leiterbahnlayout entworfen. Die Grundlage bildet die statistische Versuchsplanung, damit eine optimale Allokation möglich ist. Mit dem Testobjekt können mit einer einzigen Umformung vier voneinander unabhängige

Stempelstreckversuche sowie neun unterschiedlich skalierte Thermoformversuche durchgeführt werden. Im Mittelpunkt steht letztendlich die experimentelle Bestimmung der Ursachen-Wirkung-Beziehung zwischen den Einflussgrößen und der gemessenen Widerstände der Leiterbahnen. Die Versuche wurden mit dem in der Abbildung 2 dargestellten und für die Versuchsreihe angepassten Thermoformversuchsstand durchgeführt.

### V Versuchsergebnisse

Mit jeder Versuchsprobe (siehe Abbildung 3) werden 99 separierte Leiterbahnen umgeformt. Ein Vergleich der Widerstandswerte vor bzw. nach der Umformung wird für die Ermittlung des Einflusses des Formprozesses genutzt. Das Abbruchkriterium ist erreicht, wenn eine Widerstandserhöhung von 1000% gemessen wird bzw. wenn das Trägersubstrat Risse oder andere qualitative Einschränkungen aufweist. Neben dem zu erwartenden negativen Einfluss der Verstreckungen zeigt sich, dass die Umformgeschwindigkeit sowohl bei den Stempelverstreckungen, als auch bei den Thermoformversuchen eine signifikante Einflussgröße darstellt. Mit steigender Umformgeschwindigkeit verschlechtert sich die Leitfähigkeit der Leiterbahnen zunehmend. Damit wird die These bestätigt, dass der uniaxiale Zugversuch nur in unzureichendem Maße für die Charakterisierung der dehnbaren Pasten verwendet werden kann. Eine gezielte Steuerung der Umformgeschwindigkeit kann über den eingestellten Umformdruck erreicht werden. Der direkte Einfluss unterschiedlicher Umformgeschwindigkeiten ist auf Abbildung 4 dargestellt.

Eine indirekte Beeinflussung der Leiterbahnen erfolgt durch die Wahl der Trägersubstrate, in diesem Fall Polycarbonat (PC), und der damit verbundenen thermischen Belastung die notwendig ist, damit eine Umformung stattfinden kann. Bei der verwendeten Silberleitpaste bewirken Temperaturen ab 170°C eine Verschlechterung des Dehnungsvermögens. Außerdem zeigt sich, dass die Leiterbahnen den Umformprozess und damit die Formgebung negativ beeinflussen. Bei geringem Umformdruck von unter 4 bar verhindern die Leiterbahnen eine vollständige Ausformung des Hybridbauteils, wenn ein Verstreckverhältnis von 55% zu realisieren ist. Ein Substrat ohne Bedruckung kann unter den gleichen Randbedingungen vollständig umgeformt werden. Denkbar ist, dass die dehnbaren Pasten aufgrund der guten wärmeleitenden

Eigenschaften des Trägermaterial lokal abkühlen. In der Folge verschlechtert sich die Thermoformbarkeit. Eine weitere Möglichkeit ist der mechanische Einfluss der dehnbaren Pasten, wodurch höhere Kräfte für eine vollständige Ausformung benötigt werden.

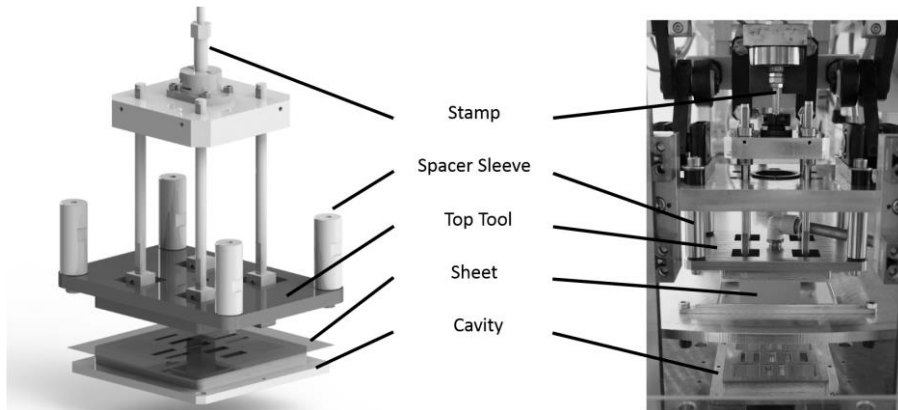


Abbildung 2: Versuchsaufbau der Umformeinheit

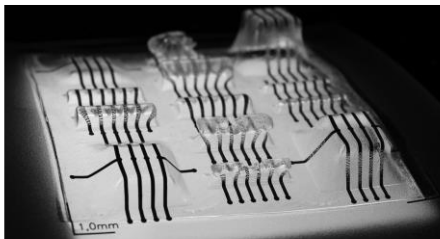


Abbildung 3: Umgeformte Versuchsprobe

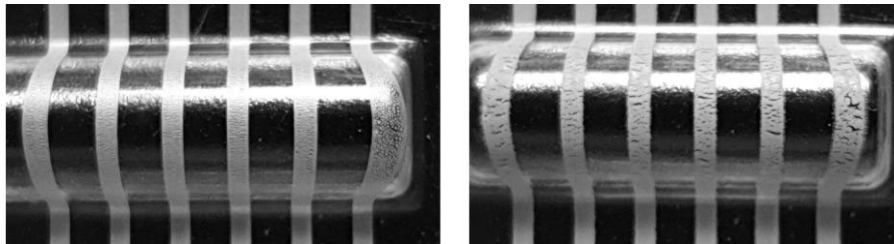


Abbildung 4: Einfluss unterschiedlicher Umformdrücke (links 3 bar, rechts 6 bar)

## Formgebung der dreidimensionalen Elektronik

Die Herstellung von dreidimensionaler Elektronik erfordert insbesondere ein Abwägen zwischen der geforderten Funktionalität und der technologischen Realisierbarkeit. Aus diesem Grund ist, ausgehend von den zentralen Eigenschaften und Funktionen, wie z.B. Bauteilhöhe, Beleuchtung, usw., das Formteil entsprechend zu gestalten und zu parametrieren, damit kritische Zielkriterien, wie die maximale Umformbarkeit der Leiterbahnpaste, nicht überschritten wird. Die numerische Simulation ist ein zentrales Werkzeug, um die zahlreichen Parameter des Produktes zu variieren und hinsichtlich des vorab festgelegten Zielkriteriums zu optimieren.

Die ermittelten Grenzen und Einflüsse der Leiterbahnen für die jeweilige Materialkombination werden für die Auslegung des Designs genutzt. In einem ersten Schritt wird die grundlegende Form des Produktes festgelegt, die anschließend mithilfe einer numerischen Simulationsstudie optimiert wird. Durch eine konservative Modifikation der Formteilgeometrie, z.B. durch eine Variation der Radien und Formschrägen und einem dem Formteil angepassten Heizprofil, kann die lokale Verstreckung möglichst geringgehalten werden. Im Ergebnis können Ausformtiefen realisiert werden, die ohne die Kombination der Simulationsmethoden nicht möglich wären (siehe Abbildung 5). Bereiche, auf denen eine Bestückung von Bauelementen vorgesehen ist, müssen bereits in der Konzeptphase feststehen und dürfen nicht gedehnt werden. Klassischerweise erfolgt die Fixierung über nicht dehnbare Klebverbindungen. Eine Fixierung auf Radien oder andere unebenen Flächen ist nicht möglich.

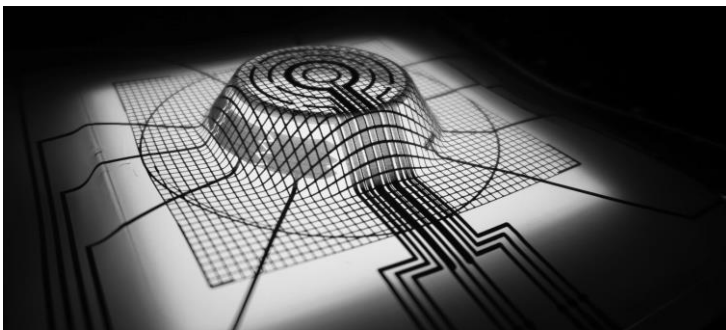


Abbildung 5: Dreidimensionale Funktionsstruktur; Formgebung mittels Simulationsstudie optimiert



Im nächsten Schritt stellt sich die Frage, inwieweit entsprechende Eigenschaften erreicht werden. Beim Thermoformen stehen verschiedene Heiz- und Formtechnologien zur Verfügung, mit deren Hilfe eine gezielte Steuerung der Umformprozesse gewährleistet wird. Mit dem numerischen Material- und Prozessmodell können mit geringem Aufwand die verschiedenen Technologien miteinander verglichen und parametrisiert werden.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Mit dem Ziel eine schnelle und einfache Herstellung von dreidimensionaler Elektronik zu ermöglichen, wurde ein innovatives Konzept für einen zukünftigen Produktionsprozess erarbeitet. Durch die Kombination des in der Verpackungstechnik weit verbreiteten Thermoformprozesses und den in der Leiterplatten etablierten Techniken des Siebdruckes bzw. dem Pick & Place von Bauteilen, kann eine schnelle und kostengünstige Produktion erreicht werden. Die dafür notwendige Voraussetzung zur Entwicklung der dreidimensionalen Elektronik wurde geschaffen. Mit dem entwickelten Testobjekt kann das Hybridmaterial unter thermoformnahen Bedingungen untersucht werden. Mithilfe der anschließend folgenden numerischen Simulation wird eine Optimierung des Designkonzepts in Bezug auf seine Eignung beim Thermoformen gewährleistet.

In der weiterführenden Bearbeitung erfolgt eine Untersuchung weiterer Materialkombinationen, damit in Abhängigkeit der gewünschten Formteilgeometrie eine optimale Materialkombination gewählt werden kann. Aus den Versuchsergebnissen der numerischen und experimentellen Simulation werden Designregeln für Conformable Electronics abgeleitet. Die Umsetzung des Gesamtkonzepts wird durch die Entwicklung einer Demonstratoranlage mit dem Rolle-zu-Rolle-Verfahren, kurz R2R-Verfahren, aufgezeigt.

## **Verbundprojekt**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03INT509BI gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Literaturverzeichnis

- Engelmann, S. 2012: Advanced Thermoforming, Methods, Machines and Materials, Application and Automation. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Frank, J. 2013: Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID), Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgegossene Schaltungsträger. München: Hanser Verlag.
- Liebig, D. 2008: Einfluss der Verarbeitungsparameter beim Thermoformen auf Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von Polyethylenterephthalat. Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Orlob, C., Kornek, D., Preihs, S. & Rolfes, I. 2009: Comparison of methods for broadband electromagnetic characterization of molded interconnect device materials. In: Advances in Radio Science 7, S11-15
- Throne, J.L. 1996: Technology of Thermoforming. München: Hanser Verlag
- Schierbaum, T. 2017: Systematik zur Kostenbewertung im Systementwurf mechatronischer Systeme in der Technologie Molded Interconnect Devices (MID). Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.
- Schwarzmann, P. 1997: Thermoformen in der Praxis. München: Hanser Verlag.

## Kontakt

Dipl.-Ing. Florian Schaller  
 Dipl.-Ing. Fabian Kayatz  
 Msc.-Ing. Cedric Wilfried Sanjon  
 Fraunhofer IWV  
 Heidelberger Str. 20  
 01189 Dresden  
[www.iwv.fraunhofer.de](http://www.iwv.fraunhofer.de)

# Lösungsansätze für eine nachhaltigkeitsorientierte, interdisziplinäre Produktentwicklung

Barbara Gröbe-Boxdorfer

Der „Earth Overshoot Day“ markiert den Tag, ab dem die Menschheit aus ökologischer Sicht über ihre Verhältnisse lebt. In diesem Jahr fällt er bereits auf den 2. August und damit auf das früheste Datum seit der globale Overshoot in den 1970er Jahren begann (Global Footprint Network 2019).

Die Menschen nutzen die Natur inzwischen 1,7-mal schneller, als Ökosysteme sich regenerieren können. Bereits heute wären in etwa 1,7 Erden zur Deckung des Ressourcenbedarfs der Menschheit nötig (Global Footprint Network 2019).

Die Forderungen nach einem nachhaltigen Umgang mit dem Planet Erde sind heute so drängend wie nie zuvor. Als gesichert gilt die Erkenntnis, dass die menschlichen Aktivitäten erkennbar negative Auswirkungen auf das Ökosystem der Erde haben (Meadows 2000; Rockström et al. 2009; John 2013; Wehrspaun und Schack 2013; Schmidt-Bleek 2014; Schmidt und Frank 2018; Kropp 2013). Mit der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung formulierte die internationale Staatengemeinschaft 2015 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs), die alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit - Soziales, Umwelt und Wirtschaft – gleichermaßen berücksichtigen.

Die Umsetzung der 17 Ziele ist allerdings freiwillig und jeder Staat entscheidet selbst über die Maßnahmen zur Erreichung der Ziele (BMZ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 2017).

In der Debatte besteht inzwischen Einigkeit darüber, dass die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen, wie sie beispielsweise in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung zugrunde gelegt wurden, nicht ohne einen Wandel der

gegenwärtigen Produktions- und Konsummuster sowie existierender Strategie- und Entscheidungsprozesse möglich sein wird (Grunwald und Kopfmüller 2012). Wie dieser Wandel aussehen und welche Steuerungsinstrumente in welcher Eingriffstiefe für die gesellschaftlichen Veränderungsprozesse einzusetzen sind, wird jedoch in Wissenschaft und Politik kontrovers diskutiert (Grunwald und Kopfmüller 2012; Schmidt-Bleek 2014; Sachs und Santarius 2005).

Das gegenwärtige ökonomische System basiert auf Wachstum. Menschen, insbesondere in den Industrienationen, sind nicht bereit zu verzichten, sondern es kommt seit Jahren zu einer Steigerung des Konsums, der durch Werbung und die stetige Einführung neuer Produkte angeregt wird (Kropp 2019). Der Club of Rome hat bereits 1972 auf „Die Grenzen des Wachstums“ hingewiesen und deutlich gemacht, dass es in einer Welt mit begrenzten Ressourcen kein unbegrenztes Wachstum geben kann (Meadows 2000). Die politischen Systeme setzen jedoch immer noch auf Wirtschaftswachstum in Verbindung mit Nachhaltigkeitsanforderungen (Konzepte wie z.B. „Green Growth“ und „Green Economy“) und in Unternehmen ist die Bedeutung des Umweltthemas im Vergleich zu anderen Unternehmenszielen immer noch gering (Lindahl 2005; Baumann et al. 2002).

### **Zielsetzung der Untersuchung**

Die durch Menschen geschaffene Produkte spielen im oben beschriebenen Szenario eine besondere Rolle, denn über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg verursachen Produkte Umweltauswirkungen: durch die Gewinnung und Verarbeitung ihrer Rohstoffe, ihre Herstellung und Verteilung, ihre Nutzung und am Ende des Produktlebenszyklus durch ihre Entsorgung.

Unternehmen als Hersteller von Gütern und Dienstleistungen beeinflussen somit durch ihre investitions-, produkt- und produktionsprozessbezogenen Entscheidungen direkt die zukünftige Entwicklung von Ressourcenverbrauch und Umweltbelastungen (Grunwald und Kopfmüller 2012).

Die Produktentwicklung hat als Disziplin großen Einfluss auf alle Lebensphasen eines Produkts. Der Produktentwickler hat durch seine Entscheidungen nicht nur Einfluss darauf, wie und aus welchem Material das Produkt gefertigt wird, wie es verpackt und transportiert wird, sondern er beeinflusst auch die

spätere Nutzungsphase. Die künftigen Eigenschaften der Produkte (u.a. Ressourcenverbrauch, Nutzung und Möglichkeiten zur Entsorgung) werden bereits bei ihrer Entwicklung festgelegt. Die Produktentwicklung nimmt daher eine zentrale Rolle ein, um Ziele der Nachhaltigkeit zu erreichen.

Daraus ergibt sich die Frage, wie insbesondere die Produktentwicklung zukünftig Forderungen nach Nachhaltigkeit Rechnung tragen kann. Wie können Produkte und ihre Herstellungsprozesse künftig so gestaltet werden, dass ihre verursachten Auswirkungen auf die Umwelt über den gesamten Lebenszyklus hinweg möglichst minimiert werden?

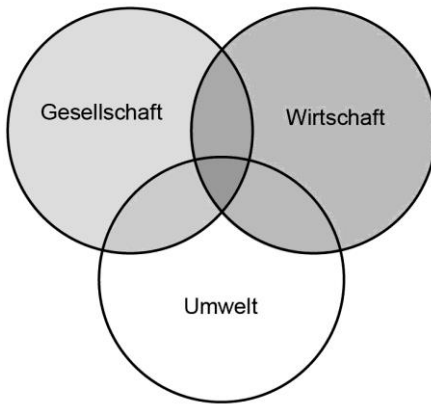
### **Zum Begriff der Nachhaltigkeit**

Eine erstmalige Erwähnung des Begriffs „Nachhaltigkeit“ findet sich bereits 1713 bei Hans Carl von Carlowitz, der diesen Begriff in der Forstwirtschaft verwendete. Im forstwirtschaftlichen Kontext bedeutet Nachhaltigkeit, dass durch Abholzung nur so viele Bäume gefällt werden, wie auch durch Baumneupflanzungen nachwachsen können (Carlowitz Nachdruck 2013).

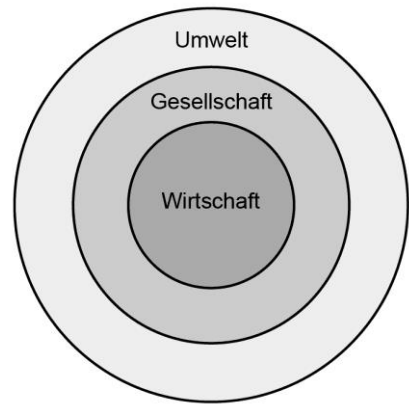
Aufgrund der Zunahme von Umweltbelastungen, sozialer und ökonomischer Krisen wurde 1987 von der Kommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen im Brundtland-Bericht nachhaltige Entwicklung definiert als „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Brundtland 1991).

Nachhaltige Entwicklung erfordert daher eine Umsteuerung, die die Lebenssituation der heutigen Generation verbessert und gleichzeitig sie sozialen, wirtschaftlichen und natürlichen Grundlagen der zukünftigen Generationen erhält (Grunwald und Kopfmüller 2012, S. 11).

Eine Übersicht über die geschichtlichen und politischen Meilensteine zum Begriff der Nachhaltigkeit findet sich u.a. bei (Kropp 2019; Grunwald und Kopfmüller 2012; Bundesregierung Deutschland 2017) und im Lexikon der Nachhaltigkeit (Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken).



Die konventionelle ökonomische Sicht der Interaktion zwischen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt.



Das Paradigma der grünen Ökonomie: Die Ökonomie operiert in einem sozialen Beziehungsgeflecht und die Gesellschaft als Ganzes ist in die natürliche Umwelt eingebettet.

Abbildung 1: Neuausrichtung des Verhältnisses zwischen Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt nach (Cato 2012)

Es genügt heute nicht mehr, in der Entwicklung nur die Unternehmens- und Produktions- und Recyclingseite zu betrachten, vielmehr muss eine ernstgemeinte Nachhaltigkeitsbestrebung auch die gesellschaftlichen und sozialen Entwicklungen frühzeitig mit einbeziehen. Deshalb kann mit Blick auf die Nachhaltigkeit die Produktentwicklung nicht losgelöst von den anderen beteiligten Systemen erfolgen.

### Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung

Die oben beschriebenen Erkenntnisse führen zwangsläufig zu neuen Rahmenbedingungen für die Entwicklung, Nutzung, Wiederverwendung und Wiederverwertung von Produkten und ist für Unternehmen und Nutzer gleichermaßen von Bedeutung. Die Nachhaltigkeitseigenschaften eines Produkts ergeben sich dabei nicht nur aus produktinhärenten Eigenschaften, sondern in erheblichem Umfang durch die Wechselwirkung des Produkts mit seinem Umfeld.

Die Produktentwicklung selbst wird, unabhängig von Nachhaltigkeitsanforderungen, schon durch eine Vielzahl von Randbedingungen beeinflusst, wie kürzere Entwicklungszeiten, steigender Kostendruck, Komplexitätszunahme, Unsicherheiten im Umgang mit neuen Technologien sowie sich dynamisch stetig verändernde Kundenwünsche, ausgelöst durch gesellschaftliche Veränderungen, Wettbewerber oder das eigene Produktportfolio (Engeln 2019). Produkte zu schaffen, die eine Vielzahl unterschiedlichster Merkmale möglichst gut in sich vereinen ist keine leichte Aufgabe und erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit von Entwicklung, Design, Produktion, Marketing, Vertrieb, Einkauf und Controlling sowie eine sehr gute Organisation der Leistungsprozesse und Verantwortlichkeiten (Engeln 2011; Lindemann 2005).

## Stand der Forschung

Nachhaltige Produktentwicklung ist die Bezeichnung für die Einbeziehung von ökologischen Aspekten und Anforderungen im Produktentwicklungsprozess. Diese Vorgehensweise wird auch als „Design for Sustainability“, „Design for Environment“, „Green Design“, „Life-Cycle-Thinking“ oder „environmentally conscious design“ bezeichnet. Weitere Begriffe, die oft im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit oder Sustainability genutzt werden sind u.a. „Corporate Social Responsibility“, „Corporate Citizenship“ oder „Corporate Sustainability“.

Zahlreiche Forschungseinrichtungen und Institute, Unternehmensverbände, Vereine usw. beschäftigen sich inzwischen mit dem Thema Nachhaltige Entwicklung u.a.:

- Das Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) in Frankfurt,
- das Wuppertaler Institut für Klima, Umwelt, Energie,
- das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am KIT in Karlsruhe,
- das Öko-Institut e. V. in Freiburg,
- die Division for Sustainable Development Goals in New York und
- das european network of ecodesign centres (enec).

Gleichzeitig wurden in den letzten Jahren Gestaltungsprinzipien für eine nachhaltige Produktentwicklung entwickelt, u.a.:

- Cradle to cradle (McDonough und Braungart 2002), Recyclingverfahren für einen vollständig geschlossenen Stoffkreislauf,
- 10 Grundprinzipien der Bionik (Nachtigall 2010), technische Ansätze zur Verbesserung der Produkte in Konstruktion und Entwicklung,
- Eco Design Checklisten und Werkzeuge (Tischner und Moser 2015; Abele et al. 2008) zur Einbeziehung von Umweltaspekten in alle Phasen des Produktentwicklungsprozesses,
- Life Cycle Management (Herrmann 2010), Strategien zur Reduzierung der negativen Umweltauswirkungen entlang der Produktlebensdauer,
- 12 Prinzipien für die umwelt- und entsorgungsfreundliche Gestaltung von Produkten in der Produktentwicklung, zusammengestellt vom Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (Hopfenbeck und Jasch 1995).

Es bestehen eine Reihe normativer Rahmenbedingungen zur ökologischen Gestaltung von Produkten: Unter andern sind dies die EU-Ökodesign-Richtlinie ab 2009 für die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Europäische Union 2009), das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG), das Kreislaufwirtschaftsgesetz (§§ 23 bis 27 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes KrwG), das Elektro- und Elektronikgerätegesetz von 2015, die Normenreihe ISO 14040 (ISO EN DIN 14040:2006) für die Ökobilanzierung, die VDI-Richtlinie VDI 4605:2017-10 und die DIN EN ISO 14006:2011-10.

Das Eco-Management and Audit Scheme (EMAS) gilt als das anspruchsvollste System für nachhaltiges Umweltmanagement weltweit. Es erfasst und strukturiert die umweltrelevanten Aktivitäten und Auswirkungen eines Unternehmens. Die teilnehmenden Unternehmen verpflichten sich, ihre Umweltleistung kontinuierlich und systematisch zu verbessern und alle Rechtsvorschriften einzuhalten. Die Umweltleistung der Unternehmen wird anhand von Kernindikatoren (u. a. Energie-, Material- und Ressourceneffizi-



enz) gemessen. Geprüft wird durch einen externen Gutachter. Alle EMAS Teilnehmer werden in einem öffentlichen Register geführt. Die Anzahl der in Deutschland registrierten EMAS-Standorte, ist im März 2019 auf mehr als 2200 gestiegen (Gesamtliste aller EMAS-Teilnehmer 2019).

Mit der zunehmenden Bedeutung von Nachhaltigkeitskonzepten wurde auch eine große Anzahl von Methoden und Werkzeugen, Normen und Verordnungen entwickelt, um die Umsetzung in Industrieunternehmen zu ermöglichen. Es gibt inzwischen zahlreiche wissenschaftliche Publikationen, die den Einsatz und die Wirksamkeit dieser Methoden und –Werkzeugen untersucht haben.

Sie kamen zu dem Ergebnis, dass zwar sehr viel über umweltgerechte Produktentwicklung geschrieben wird, sich in der Praxis dazu aber im Verhältnis wenig geändert hat (Fitzgerald et al. 2007; Baumann et al. 2002; Rossi et al. 2016).

Als hauptsächliche Barrieren bzw. Herausforderungen können u.a. genannt werden:

- Prozesse Einzelne Werkzeuge sind nicht von großer Bedeutung. Es werden Prozesse gebraucht, die individuell auf die Unternehmen zugeschnitten sind (Fitzgerald et al. 2007; Baumann et al. 2002). Nachhaltigkeitsprozesse sollten so gestaltet sein, dass sie in die bereits existierenden Organisations-, Informations- und Entscheidungsstrukturen des Unternehmens integriert werden können (Herrmann und Schmidt 2006; Fitzgerald et al. 2007; Poulikidou et al. 2014).
- Toolkits Die einzelnen Werkzeuge oder Checkliste betrachten jeweils nur Einzelaspekte. Es wurde nichts darüber gefunden, wie zusammengesetzte Toolkits am besten funktionieren und einzusetzen sind (Baumann et al. 2002; Fitzgerald et al. 2007).
- Prozessphase Die frühen Produktentwicklungsphasen wurden als die einflussreichsten für das Einbringen nachhaltiger Merkmale identifiziert (Baumann et al. 2002; Poulikidou et al. 2014; Fiksel 2011; Tischner und Moser 2015). Es fehlen aber noch Werkzeuge für diese frühe Phasen (Baumann et al. 2002).

- Wissen** Es bedarf eines gewissen Wissenslevels als Voraussetzung für die richtige Verwendung der Werkzeuge. Interdisziplinär zusammengesetzte Teams unter Anleitung eines Experten erzielen bessere Ergebnisse. Die richtige Anleitung zum Arbeiten mit nachhaltigen Werkzeugen ist wichtig (Baumann et al. 2002; Poulikidou et al. 2014).  
Es besteht ein Mangel an Wissen, das sich nicht nur auf den Einsatz der Werkzeuge selbst beschränkt, sondern auch auf Umweltfragen im Allgemeinen, um die Ergebnisse der bereitgestellten Instrumente interpretieren oder die richtigen Lösungen anwenden zu können (Ritzen 2000).
- Komplexität** Die große Anzahl und Spezifität der vorhandenen Werkzeuge erschwert das Auswählen des geeigneten Werkzeugs für die unternehmensspezifischen Bedürfnisse (Araujo 2001; Rossi et al. 2016).  
Es wird ein Leitfaden für die Auswahl des geeigneten Ökodesign-Tools benötigt (Bovea und Pérez-Belis 2012).  
Die Methoden sind zu überformalisiert und komplex (Cross 2008).
- Praxis-nähe** Es gibt zu viele normative Vorschläge mit wenig praktischem Nutzen (Baumann et al. 2002).  
Es gibt eine Differenz zwischen den akademisch entwickelten Methoden und den tatsächlichen Bedürfnissen von Unternehmen (Cross 2008).
- Management/ Strategie** Der Nachhaltigkeitsgedanke ist auf Managementebene zu wenig implementiert (Baumann et al. 2002).  
Es werden mehr unternehmensspezifische Werkzeuge gebraucht, die zur Unternehmensstrategie passen (Baumann et al. 2002).  
Es gibt zu wenig Verknüpfungen zwischen der strategischen Absicht des Unternehmens und den Inhalten in der täglichen Arbeit (Baumann et al. 2002).  
Unternehmen haben Schwierigkeiten, traditionelle Designprozesse zu modifizieren und wenden nicht gern zusätzliche Zeit für Aktivitäten auf, die noch nicht mit erfolgreichen Strategien verbunden sind (Rossi et al. 2016).

- Res- Es fehlen zusätzliche Ressourcen sowohl in wirtschaftlicher als  
sourcen auch in personeller Hinsicht, in Bezug auf Zeit und Daten (z.B. Zeit und Ressourcen, um sich der Umweltanalyse zu widmen und Wissen zu erwerben; Notwendigkeit, über eine große Menge an Daten zu verfügen, die oft nicht dem Unternehmen, sondern externen Lieferanten gehören) (Rossi et al. 2016; Hilla-ry 2004; van Hemel und Cramer 2002).
- Erfolg Die Verwendung eines Werkzeugs führt nicht automatisch zu umweltverträg-licheren Produkten (Fitzgerald et al. 2007). Die Überprüfung, ob die spezifischen Anforderungen an die Produkte erfüllt tatsächlich erfüllt sind, ist schwer durchzuführen (Rossi et al. 2016).
- Externe Die schwer einschätzbaren Kundenreaktionen vergrößern die  
Aspekte Hemmnisse zur Implementierung von Eco Design Methoden in Unternehmen (Bey et al. 2013; Boks 2006).  
Durch ein vermutetes mangelndes Verbraucherbewusstsein werden wirtschaftliche Nachteile für das Unternehmen befürchtet (van Hemel und Cramer 2002).  
Umweltverbesserungen werden hauptsächlich aufgrund von strengeren Vorschriften erreicht (Baumann et al. 2002; Rossi et al. 2016). Es besteht aber eine mangelhafte Gesetzgebung, durch das Fehlen von Normen und spezifische zwingende Vorschriften (Bey et al. 2013).

## Der unternehmerische Entwicklungsprozess der Zukunft

Mit dem Leitbild der Nachhaltigkeit ist eine Gestaltungsaufgabe extrem hoher Komplexität verbunden. Gleichzeitig ist das Wissen über komplexe Systemzusammenhänge, zukünftige Entwicklungen und die Folgen eingeleiteter Maßnahmen (u.a. neue Technologien) unsicher, unvollständig und vorläufig (Grunwald und Kopfmüller 2012; Engeln 2019). Dieser Wissensmangel kann nur durch multi-, trans- und interdisziplinäre Zusammenarbeit und Kooperation ausgeglichen werden (Grunwald und Kopfmüller 2012; Engeln 2019; Sennett 2012; Hennen und Krings 2000).

Gleichzeitig könnten Innovationen einen Ausweg bieten, um Ressourcenknappheit und negative Umwelteffekte zu überwinden (Ekins et al. 2019;

Grunwald und Kopfmüller 2012; Fournier und Woidasky 2019). Ein möglicher Ansatz geht davon aus, dass die Probleme nicht mit inkrementellen, kleinen Innovationen gelöst werden können, sondern eher durch ein neues techno-ökonomisches Paradigma, das grundlegende technologische Entwicklungen erfordert (Fournier und Woidasky 2019, S. 276). Es geht also weniger um eine Verbesserung vorhandener Produkte, sondern um die Entwicklung neuer Produkte und Systeme (Grunwald und Kopfmüller 2012). Wichtig ist hierbei, den Fokus nicht allein auf technische Innovationen zu setzen. Die Technik kann nicht losgelöst von sozialen und gesellschaftlichen Prozessen betrachtet werden. Vielmehr müssen Umweltveränderungen in einen umfassenden gesellschaftlichen Kontext gestellt werden und ökonomische sowie soziale Ziele und Lösungsansätze gleichermaßen berücksichtigen (Wölfel 2016; Rückert-John 2013).

Entscheidend ist, dass eine nachhaltige Innovation auch erfolgreich in den Markt gelangt. Dieser Prozess der Innovationsdiffusion hängt in erheblichem Maß von der Einschätzung potenzieller Käufer, bestehenden Lebensstilen, sozio-ökonomischen und kulturellen Faktoren sowie von den politisch-institutionellen Rahmenbedingungen ab (Rogers 2003).

Ingenieure und Produktdesigner nehmen unterschiedliche Sichtweisen auf das Produkt und den späteren Nutzer ein und wenden dazu auch unterschiedliche Werkzeuge und Methoden an. Beide Disziplinen sind bei vielen Produkten von zentraler Bedeutung für den Erfolg des Produkts und somit auch für die Nachhaltigkeit des Produkts. In beiden Disziplinen existieren bereits Ansätze zur nachhaltigen Produktentwicklung (Tischner 2011; Chick und Micklethwaite 2011; Koslowski et al. 2013; Scholz et al. 2018). „Design beeinflusst das Produkt. Das Produkt beeinflusst die Gebrauchsfunktion. Die Gebrauchsfunktionen beeinflussen die zwischenmenschlichen Beziehungen. Design ist kein technisches, kein künstlerisches, sondern ein soziales Phänomen“ (Lengyel 1998, S. 118).

Das macht Produktdesigner zum entscheidenden Partner von Ingenieuren für die soziale und gesellschaftliche Perspektive in der Produktentwicklung. Produkte und Systeme sollten durch Ingenieure und Produktdesigner so gestaltet sein, dass sie das menschliche Verhalten beeinflussen und nachhaltiges und verantwortungsbewusstes Handeln unterstützen und gleichzeitig sozial annehmbar sind.

## Forschungsfragen

Die vorliegende Forschungsarbeit hat zum Ziel, aus der interdisziplinären Zusammenarbeit der beiden Fachdisziplinen Ingenieurwissenschaften und Design heraus, neue Potenziale zur Verbesserung des Nachhaltigkeitsprofils von Produkten im Zusammenhang mit gesellschaftliche Prozessen aufzuzeigen. Dabei sollen alle drei Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses: Ideen-, Produktplanungs- und die Konzeptentwicklungsphase. Denn in diesen frühen Phasen wird bereits der gesamte Produktlebenszyklus festgelegt und gestaltet. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Untersuchung des Zusammenhangs von technischen Nachhaltigkeitsanforderungen und gesellschaftlichen Nutzungskontexten.

Wichtige Fragen sind in diesem Zusammenhang:

- Wie müssen zukünftige Innovationen gestaltet sein, damit sich daraus ein positiver Beitrag für die Nachhaltige Entwicklung ergibt?
- Wie können innovative nachhaltige Produkte und Systeme entwickelt werden, die sowohl neue und nachhaltige Technologien berücksichtigen als auch gleichzeitig auf aktuelle gesellschaftliche und soziale Prozesse und Entwicklungen referenzieren?
- Wie muss ein Entwicklungsprozess gestaltet werden, der eine stärkere Einbeziehung sozialer und gesellschaftlicher Entwicklungen und Tendenzen als Ziel hat?
- Welches Wissen ist notwendig für eine nachhaltige Produktentwicklung? Welche Disziplin verfügt darüber, und wie kommt das Wissen in den Prozess?
- Welchen Beitrag können Ingenieure und Designer konkret in interdisziplinären Projektteams zur Entwicklung von nachhaltigen Produktinnovationen leisten?

## Projektstatus / Ausblick

Die Arbeit fokussiert im Untersuchungsteil primär auf den Bereich der Landwirtschaft (Konsum- und Investitionsgüter), da nachhaltiges Denken hier bereits stärker verankert, gesellschaftlich erwartet und auch verlangt wird. Die Landwirtschaft stellt einen Schlüsselfaktor für nachhaltige Entwicklung dar, der eng mit anderen Faktoren wie Wasser, Ernährung und Energie gekoppelt ist. Dabei kommt der Entwicklung nicht nur ökologisch, sondern auch kulturell und sozial angepasster Methoden und Technologien eine wichtige Bedeutung zu (Grunwald und Kopfmüller 2012). Es wird angestrebt später noch ein zweites Feld im Ausblick zu eröffnen, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Bereiche zu überprüfen. In einem weiteren Schritt werden die Kernkompetenzen der beiden Disziplinen Ingenieurwissenschaften und Produktdesign konkret auf Fragestellungen der Nachhaltigkeit hin beleuchtet um daraus mögliche Potenziale der interdisziplinären Zusammenarbeit abzuleiten.

Auf Basis und nach Abschluss der Literaturrecherche soll in einem ersten Schritt aus den Erkenntnissen ein Fragenkatalog für die qualitative Expertenbefragung von Vertretern aus Industrie (Konsum- und Investitionsgüterhersteller landwirtschaftlicher Produkte und Maschinen), Anwendern (Landwirte) und Forschungseinrichtungen durchgeführt werden.

## Literaturangaben

- Abele, Eberhard; Anderl, Reiner; Birkhofer, Herbert; Rüttinger, Bruno (Hg.) (2008): EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Araujo, Claudiano (2001): Acquisition of Product Development Tools in Industry: a Theoretical Contribution. Ph.D. Thesis, Lyngby.
- Baumann, H.; Boons, F.; Bragd, A. (2002): Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. In: Journal of Cleaner Production (10), S. 409–425.
- Bey, Niki; Hauschild, Michael Z.; McAloone, Tim C. (2013): Drivers and barriers for implementation of environmental strategies in manufacturing companies. In: CIRP Annals 62 (1), S. 43–46.
- BMZ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Hg.) (2017): Der Zukunftsvertrag für die Welt. Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung.  
[http://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/reihen/infobroschueren\\_flyer/infobroschueren/Materialie270\\_zukunftsvertrag.pdf](http://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/reihen/infobroschueren_flyer/infobroschueren/Materialie270_zukunftsvertrag.pdf), abgerufen am 01.03.2019.

- Boks, Casper (2006): The soft side of ecodesign. In: Journal of Cleaner Production 14 (15-16), S. 1346–1356.
- Bovea, M. D.; Pérez-Belis, V. (2012): A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. In: Journal of Cleaner Production (20), S. 61–71.
- Brundtland, Gro Harlem (1991): Our common future. Oxford: Univ. Press.
- Bundesregierung Deutschland (Hg.) (2017): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975292/730844/3d30c6c2875a9a08d364620ab7916af6/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-neuauflage-2016-download-bpa-data.pdf?download=1>, abgerufen am 02.03.2019.
- Carlowitz, H. C. von (Nachdruck 2013): Sylvicultura oeconomica. Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Nachdr. der Ausg. Leipzig 1713. München: oekom Verlag.
- Cato, Molly Scott (2012): Green economics: putting the planet and politics back into economics. In: Cambridge Journal of Economics (36), S. 1033–1049.
- Chick, Anne; Micklethwaite, Paul (Hg.) (2011): Design for sustainable change. How design and designers can drive the sustainability agenda. Lausanne: Ava Pub Sa.
- Cross, Nigel (2008): Engineering design methods. Strategies for product design. 4. ed. Chichester: Wiley.
- Ekins, P.; Gupta, J.; Boileau, P. (Hg.) (2019): Global Environment Outlook - GEO-6. Healthy Planet, Healthy People. New York: Cambridge University Press.
- Engeln, Werner (2011): Methoden der Produktentwicklung. 2. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverlag.
- Engeln, Werner (Hg.) (2019): Produktentwicklung. Herausforderungen, Organisation, Prozesse, Methoden und Projekte. 1. Auflage. Essen: Vulkan Verlag.
- Europäische Union (Hg.) (2009): Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Online verfügbar unter [https://www.eup-network.de/fileadmin/user\\_upload/Hintergrund/EuP-Dokumente/richtlinie\\_2009\\_125\\_EG.pdf](https://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Hintergrund/EuP-Dokumente/richtlinie_2009_125_EG.pdf), abgerufen am 01.03.2019.
- Fiksel, Joseph (2011): Design for environment. A guide to sustainable product development. 2nd ed. New York, London: McGraw-Hill Professional.
- Fitzgerald, Daniel; Herrmann, Jeffrey; Schmidt, Linda C. (2007): Design for Environment (DfE): Strategies, Practices, Guidelines, Methods, and Tools. In: Myer Kutz, (Hg.): Environmentally conscious mechanical design. New York: Wiley, S.1-24.
- Fournier, Guy; Woidasky, Jörg (2019): Nachhaltige Produktentwicklung. In: Werner Engeln (Hg.): Produktentwicklung. Herausforderungen, Organisation, Prozesse, Methoden und Projekte. 1. Auflage. Essen: Vulkan Verlag, S. 271–289.

- Gesamtliste aller EMAS-Teilnehmer. Stand 01.04.2019 (2019). Online verfügbar unter [https://www.emas.de/fileadmin/user\\_upload/04\\_ueberemas/Statistik/EMAS-TN-Anzahl-Bundeslaender-DIHK.pdf](https://www.emas.de/fileadmin/user_upload/04_ueberemas/Statistik/EMAS-TN-Anzahl-Bundeslaender-DIHK.pdf).
- Global Footprint Network (Hg.) (2019): Earth Overshoot Day. Online verfügbar unter <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-german/>, abgerufen am 26.02.2019.
- Grunwald, Armin; Kopfmüller, Jürgen (2012): Nachhaltigkeit. 2., aktualisierte Auflage. 2. aktualisierte Auflage Auflage. Frankfurt: Campus.
- Hennen, Leonhard; Krings, Bettina (2000): Forschungs- und Technologiepolitik für eine nachhaltige Entwicklung. Arbeitsbericht Nr. 58. Hg. v. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin.
- Herrmann, Christoph (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin: Springer.
- Herrmann, J. W.; Schmidt, L. C. (2006): Product Development and Decision Production Systems. In: Kemper E. Lewis, Wei Chen und Linda C. Schmidt (Hg.): Decision Making in Engineering Design. New York: ASME Press.
- Hillary, Ruth (2004): Environmental management systems and the smaller enterprise. In: Journal of Cleaner Production 12 (6), S. 561–569.
- Hopfenbeck, Waldemar; Jasch, Christine (1995): Öko-Design. Umweltorientierte Produktpolitik. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie.
- Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken (Hg.): Lexikon der Nachhaltigkeit. Unter Mitarbeit von Jochen Raschke. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigkeit.info>, abgerufen am 02.03.2019.
- John, René (2013): Alltägliche Nachhaltigkeit. Zur Innovativität von Praktiken. In: Jana Rückert-John (Hg.): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Perspektiven sozialen Wandels. Wiesbaden: Springer VS, S. 103–132.
- Koslowski, Malte; Dwalischwili, Georg; Marbach, Nikolaus (Hg.) (2013): Eco Design Tool. 1. Aufl. Berlin: KDID.
- Kropp, Ariane (2019): Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kropp, Cordula (2013): Nachhaltige Innovationen - eine Frage der Diffusion? In: Jana Rückert-John (Hg.): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Perspektiven sozialen Wandels. Wiesbaden: Springer VS, S. 87–102.
- Lengyel, Stefan (1998): Design: Spannungsfeld zwischen Rationalität und Emotionalität. In: Hermann Sturm (Hg.): Geste & Gewissen im Design. Köln: DuMont, S. 118–123.



- Lindahl, M. (2005): Designers' Utilization of and Requirements on Design for Environment (DfE) Methods and Tools. In: Ryoichi Yamamoto (Hg.): Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Eco Design 2005. 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Tokyo, Japan: Union of EcoDesigners, S. 224–231.
- Lindemann, Udo (2005): Der Ingenieur und seine Designer — oder der Ingenieur und seine Partner? In: Jens Reese (Hg.): Der Ingenieur und seine Designer. Berlin: Springer-Verlag, S. 297–307.
- McDonough, William; Braungart, Michael (2002): Cradle to cradle. Remaking the way we make things. New York: North Point Press.
- Meadows, Dennis L. (2000): Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, 1972. 17. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl.-Anstalt.
- Nachtigall, Werner (2010): Bionik als Wissenschaft. Erkennen - Abstrahieren - Umsetzen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Poulakidou, Sofia; Björklund, Anna; Tyskeng, Sara (2014): Empirical study on integration of environmental aspects into product development: processes, requirements and the use of tools in vehicle manufacturing companies in Sweden. In: Journal of Cleaner Production 81, S. 34–45.
- Ritzen, Sofia (2000): Integrating Environmental Aspects into Product Development, Dissertation, Integrated Product Development Division, Department of Machine Design, Stockholm.
- Rockström, Johan; Steffen, Will; Noone, Kevin; Persson, Åsa; Chapin, F. Stuart, III; Lambin, Eric (2009): Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. In: Ecology and Society 14 (2).
- Rogers, Everett M. (2003): Diffusion of innovations. 5. Auflage. New York, London, Toronto, Sydney: Free Press.
- Rossi, Marta; Germani, Michele; Zamagni, Alessandra (2016): Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies. In: Journal of Cleaner Production (129), S. 361–371.
- Rückert-John, Jana (Hg.) (2013): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Perspektiven sozialen Wandels. Wiesbaden: Springer VS.
- Sachs, Wolfgang; Santarius, Tilman (Hg.) (2005): Fair Future. Begrenzte Ressourcen und globale Gerechtigkeit; ein Report. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. München: Beck Verlag.
- Schmidt, Gavin A.; Frank, Adam (2018): The Silurian hypothesis: would it be possible to detect an industrial civilization in the geological record? In: International Journal of Astrobiology (112), S. 1–9.
- Schmidt-Bleek, Friedrich (2014): Grüne Lügen. Nichts für die Umwelt, alles fürs Geschäft - wie Politik und Wirtschaft die Welt zugrunde richten. 4. Auflage. München: Ludwig Verlag.

- Scholz, Ulrich; Pastoors, Sven; Becker, Joachim H.; Hofmann, Daniela; van Dun, Rob (Hg.) (2018): Praxis-handbuch Nachhaltige Produktentwicklung. Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Sennett, Richard (2012): Zusammenarbeit. Was unsere Gesellschaft zusammenhält. Berlin: Hanser Verlag.
- Tischner, Ursula (2011): Eco Design. Problemlösung statt Greenwashing. In: Petra Eisele und Bernhard E. Bürdek (Hg.): Design, Anfang des 21. Jahrhunderts. Diskurse und Perspektiven. Ludwigsburg: avedition, S. 80–91.
- Tischner, Ursula; Moser, Heidrun (2015): Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung. Komplett überarbeitete Neuauflage der 2000 erschienenen Publikation „Was ist EcoDesign? / How to do EcoDesign?“. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/was-ist-ecodesign>.
- van Hemel, C.; Cramer, J. (2002): Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs. In: Journal of Cleaner Production 10 (5), S. 439–453.
- Wehrspau, Michael; Schack, Korinna (2013): Umweltpolitik als Gesellschaftspolitik. In: Jana Rückert-John (Hg.): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Perspektiven sozialen Wandels. Wiesbaden: Springer VS.
- Wölfel, Sylvia (2016): Weiße Ware zwischen Ökologie und Ökonomie. München: Oekom Verlag.

## Kontakt

Dipl.-Des. Barbara Gröbe-Boxdorfer M. Sc.  
 Hochschule Pforzheim  
 Tiefenbronner Straße 65  
 75175 Pforzheim  
[www.hs-pforzheim.de](http://www.hs-pforzheim.de)

# Szenariobasierte Validierung von Produktprofilen in der Frühen Phase der PGE-Produktgenerationsentwicklung

Florian Marthaler, Vincent Kutschera, Jonas Reinemann, Nikola Bursac und Albert Albers

## Abstract

In der Frühen Phase der PGE-Produktgenerationsentwicklung werden Entscheidungen unter einem hohen Grad an Unsicherheit getroffen. Gleichzeitig haben diese Entscheidungen einen bedeutenden Einfluss auf den späteren Markterfolg von Produkten. Somit ist eine frühzeitige und kontinuierliche Validierung für den Erfolg zukünftiger Produkte notwendig.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz präsentiert, der es erlaubt, grundlegende Produkteigenschaften in der Frühen Phase der PGE-Produktgenerationsentwicklung zu beschreiben und zu modellieren. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Beschreibungsmodelle analysiert und miteinander verglichen. Anschließend wird veranschaulicht, welche Modelle und Technologien genutzt werden können, um die gewünschten Produkteigenschaften zu validieren. Im Hinblick auf die Validierungsmethode bestimmen die Ergebnisse einer durchgeführten Expertenbefragung die Relevanz von einzelnen Umfeldern. Abschließend wird eine szenariobasierte Methode zur Validierung von Produktprofilen angeleitet und auf Grundlage eines konkreten Produktprofils bewertet.

## 1 Einleitung

In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass ein Ansatz für die Entwicklung von neuen Produkten, der ausschließlich auf dem Wert neuer Ideen basiert und nur darauf ausgerichtet ist, neue Produktmerkmale auf den Markt zu bringen, nicht ausreichend ist, um einen Markterfolg zu sichern (Goldenberg

et al. 2001). Dies ist der Ansatz, der hinter zahlreichen Versuchen steht, Erfindungen in Innovationen umzuwandeln, die bereits in der Markteinführungsphase gescheitert sind, wie z.B. das Itera Plastikfahrrad. Aufgrund der Hebelwirkung von falschen Entscheidungen, die auf missverstandenen Bedarf und Einschränkungen in der Frühen Phase eines Entwicklungsprozesses basieren, gab es keine Möglichkeit, dieses Desaster mit rechtfertigter Bemühung zu lösen (Hult 1992). Deshalb ist eine frühzeitige und kontinuierliche Validierung von Produkten essenziell, um den Erfolg von zukünftigen Produkten sicherzustellen.

## 2 Ähnliche Arbeiten

Das Konzept der PGE-Produktgenerationsentwicklung bietet ein Beschreibungsmodell an, dass auf zwei Grundprinzipien aufbaut: (1) Neue Produktgenerationen, die auf Grundlage eines bestehenden Referenzproduktes entwickelt wurden (2) neue Produkte, die durch Übernahmevariation (ÜV), Gestaltvariation (GV) und Prinzipvariation (PV) erzeugt wurden. (Albers et al. 2017b) Die Frühe Phase der PGE ist gekennzeichnet durch die Einführung eines Projekts, das mit einer ausgewerteten technischen Lösung endet (Albers et al. 2017a). Aufgrund der zunehmenden Komplexität im Entstehungsprozess stellt die frühzeitige Validierung eine große Herausforderung dar (Fink und Siebe 2016). Produktprofile beschreiben den lösungsoffenen Bedarf von Kunden, Anwendern und Anbietern und erlauben den Entwicklern, die zukünftigen Produkte auf Grundlage des gewünschten Nutzens für Kunden, Anwender und Anbieter zu validieren. (Albers et al. 2018). Um Produkte und Dienstleistungen anbieten zu können, die der zukünftigen Marktsituation gerecht werden, ist es notwendig, die Entwicklung von alternativen, möglichen Zukunftsmodellen zu berücksichtigen (Feldhusen und Grote 2013), wie zum Beispiel Szenarien. Die systematische Entwicklung von Szenarien wird durch die Szenariotechnik bzw. Szenarioplanung ermöglicht: (1) Identifikation der Schlüsselfaktoren (2) Projektionen zu konsistenten Zukunftsszenarien. Die Verbindung von konsistenten Projektionen basiert auf einer paarweisen Konsistenzanalyse von zwei Projektionen (Gausemeier 2014) oder wird durch einen konsistenten Vergleich durch das Szenario-Team selbst durchgeführt.

### 3 Forschungsbedarf, Forschungsfragen und methodisches Vorgehen

Das Beispiel des Itera-Fahrrads verdeutlicht die Herausforderungen, denen die Entwickler und Entscheidungsträger während der Validierung von dynamischen Produkten gegenüberstehen. Vielversprechende Ansätze zur Validierung von Produktprofilen sind in den Methoden der Vorausschau zu finden, da diese die Qualität der Entscheidungsfindung in komplexen Entwicklungssituationen nachweislich verbessern (Meissner und Wulf 2013). Bisher fehlen Methoden, die es ermöglichen, Produktprofile mit Hilfe von Zukunftsszenarien zu validieren. Um diesen Bedarf anzugehen, müssen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie können Produktprofile in der Frühen Phase der PGE beschrieben und modelliert werden?
- Wie können die unterschiedlichen Beschreibungsvarianten für Produktprofile verglichen werden?
- Welche Validierungsoptionen sind in der Frühen Phase der PGE zur Validierung von Produktprofilen verfügbar?
- Welcher methodische Ansatz ist notwendig, um eine szenariobasierte Validierung von Produktprofilen durchzuführen?

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird gezeigt, durch welche Produktprofilvarianten die grundlegenden Produkteigenschaften beschrieben werden können. Des Weiteren wird die Auffassung der Validität eines Produktprofils in Form eines initialen Referenzmodells genutzt, um die unterschiedlichen Modellierungsvarianten zu vergleichen. Zudem zeigt das Forschungsprojekt, welche Methoden benutzt werden können, um die gewünschten Produkteigenschaften zu validieren. Abschließend wird der notwendige methodische Ansatz zur Durchführung einer szenariobasierten Validierung von Produktprofilen vorgestellt. Die Relevanz der unterschiedlichen Umfelder sowie weitere Voraussetzungen für die Methode werden im Rahmen einer Expertenbefragung mit 26 Teilnehmern und einem Experteninterview mit 6 Partnern aus der Produktentwicklungspraxis untersucht.

### 4 Modellierung von Produktprofilen

Im Laufe dieses Forschungsprojekts wurden unterschiedliche Arten der Modellierung von Produktprofilen identifiziert und bewertet.

**Methode.** Die Identifikation der Produktprofilvarianten wurde durch eine Literaturanalyse auf Grundlage der Erfahrung und Forschung am IPEK – KIT und der praktischen Erfahrung der inovex GmbH durchgeführt. Zur Ableitung der Bewertungskriterien wird ein initiales Referenzmodell genutzt (siehe Abbildung 1).

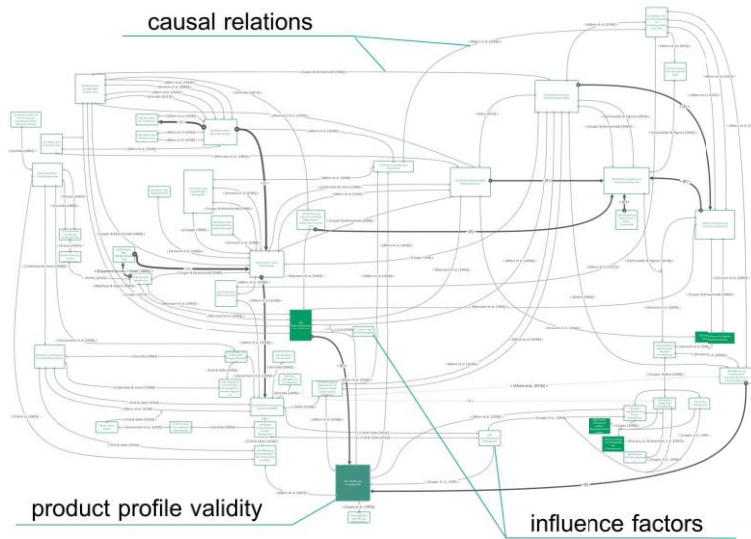


Abbildung 1: Initiales Referenzmodell (Faktoren und Beziehungen)

Um die wichtigsten Faktoren zu identifizieren und gleichzeitig die indirekten Einflüsse zu berücksichtigen, wird der PageRank-Algorithmus mit einer positiven Konvergenz und ein Dämpfungsfaktor von 0,1 verwendet (Page et al. 1999). So wurden die ersten zehn Schnittpunkte als Bewertungskriterien festgelegt. Wenn eine Übereinstimmung zwischen einem festgestellten Einflussfaktor und der Produktprofilvariante besteht, wurde dies mit einem Punkt bewertet (von insgesamt 34 Punkten).

## Ergebnisse

(1) Produktprofilschema 24/34, 71%, (2) Erweitertes Product Vision Board 23/34, 68%, (3) Lean Canvas 21/34, 62% (Last) Canvas 19,56%

## 5 Validierungsmethoden

### Ergebnisse

Die Validierung als zentrale und kontinuierliche Tätigkeit im Entstehungsprozess (Albers 2010) ist im Grunde kein objektiver Schritt, da sie an subjektive Erwartungen von Kunden, Anwendern und Anbietern gerichtet ist, die überprüft werden müssen (Kneuper 1992). Tabelle 1 bietet einen Überblick über die Methoden, die für die Validierung von Produkten im Hinblick auf den Markt, die Technologie, die Wirtschaft und die inneren Angelegenheiten des Umfelds geeignet sind. Um den informativen Wert zu steigern, ist die Nutzung einer Kombination aus mehreren Methoden angemessen (Meißner et al. 2010; Daim et al. 2006).

## 6 Vorbereitende Untersuchung im Hinblick auf die Methode

Der Entwurf der Methode wurde mit Hilfe einer Synthese der Ergebnisse aus der Untersuchung durchgeführt:

### Methode - Interview

Die Teilnehmer wurden nach dem Zeithorizont von Szenarien, spezifischen und allgemeinen Eigenschaften von Methoden, dem konkreten Design der Szenario-Bildung und den ratsamen Voraussetzungen im Hinblick auf das erste Produktprofil gefragt.

### Ergebnisse - Interview

Der Zeithorizont deckt eine weite Reichweite ab (2 - 15 oder 25 Jahre), hängt aber stark vom jeweiligen Fachgebiet, der Thematik und der Industrie ab. Die Methode sollte leicht anzuwenden und verständlich sein. Sie sollte außerdem zu Kreativität anregen, die Anerkennung bei den Entwicklern und Entscheidungsträgern fördern, konstante und zukunftsichere Ergebnisse liefern und über einen niedrigen Validierungsaufwand sowie eine niedrige Umsetzungszeitintensität verfügen (max. 30 Arbeitsstunden). Des Weiteren ist es sinnvoll, die Konsistenz des Leistungsprofils zu überprüfen.

Method/Technology	Environment			
	Market	Technology	Economy	Internal Affairs
<b>Analogy analysis:</b> (online) literature research, statistics, Case-Studies, Online Communities	Feldhusen et al. 2013 p. 350.; Henkel & Sander 2007 p. 78 ff.	Feldhusen et al. 2013 p. 350.; Henkel & Sander 2007 p. 85 ff.; Kobe 2007 p. 34.		
<b>Benchmarking:</b> Comparison, A/B-tests, Diff-in-Diff, Balanced Score Cards	Schawel et al. 2014 p. 27-30, 34-36.; Xu et al. 2015; Kohavi et al. 2013; Goldfarb & Tucker 2011; Dallmann 2001; Edgett & Snow 1996	Schawel et al. 2014 p. 34-36.; Xu et al. 2015 p. 2227; Kohavi et al. 2013; Rubin & Chisnell 2008 p. 37 ff.	Schawel et al. 2014 p. 27-30, 34-36.; Xu et al. 2015; Kohavi et al. 2013; Goldfarb & Tucker 2011; Edgett & Snow 1996	Schawel et al. 2014 p. 34-36.
<b>Observation:</b> Shadowing, videography, think-out-Loud protocol	Ruso 2009 p. 527.; Buber 2009 p. 555 ff.; Knoblauch & Schnettler 2009 p. 594 f.			
<b>Bibliometry</b>	Pestana et al. 2018 p. 86 ff.	Kobe 2007 p. 34.; Daim et al. 2006		
<b>Biometry</b> (combinatorial) Electrodermal activity, Eye-Tracking, Face-Coding, Companion	Suomala 2018 p. 142 ff.; Meixner 2017 p. 111 ff., 129 ff., 151 ff.; Fuchs & Unger 2014 p. 578 ff.			
<b>Conjoint Analysis</b>	Lüthje 2007 p. 51 ff.; Van Kleef et al. 2005	Backhaus et al. 2014 p. 61ff.		
<b>Delphi Method</b>	Di Zio 2018 p. 4 ff., Gausemeier et al. 2014 p. 88 ff.; Baxter 1995 p. 189 ff.; Linstone et al. 1975	Daim et al. 2006, Feldhusen et al. 2013 p. 358.; Kobe 2007 p. 34.; Linstone et al. 1975; Baxter 1995 p. 189 ff.	Linstone et al. 1975	Feldhusen et al. 2013 p. 358.; Linstone et al. 1975
<b>Focus groups</b>	Mayerhofer 2009 p. 479 ff.; Lüthje 2007 p. 45.; Van Kleef et al. 2005	Rubin & Chisnell 2008 p. 17.		
<b>Interviews:</b> i. a. expert-, problem- & narrative Interview, online laddering	Wattanasuwan et al. 2009 p. 373.; Aghamanoukjan et al. 2009 p. 420; Riege 2009 p. 440 f.; Gröppel-Klein & Königstorfer 2009 p. 549 f.	Aghamanoukjan et al. 2009 p. 420.; Gröppel-Klein & Königstorfer 2009 p. 549 f.; Gruber et al. 20009 p. 580.		Riege 2009 p. 440.
<b>Investment approaches:</b> Customer-lifetime-value, real options, customer contribution margin	Schawel et al. 2018 p. 93-95.; Palloks-Kahlen 2006 p. 292.; Reinecke & Keller 2006 p. 269 ff.		Schawel et al. 2018 p. 93-95.; Palloks-Kahlen 2006 p. 292.; Reinecke & Keller 2006 p. 269 ff.	
<b>Competitive analyses:</b> Strength-weakness-analysis, 4-C-analysis, strategy canvas	Gausemeier et al. 2014 p. 136 ff.; Schawel et al. 2014 p. 385 ff.; Kim & Mauborgne 2002	Schawel et al. 2014 p. 385 ff.; Kim & Mauborgne 2002	Schawel et al. 2014 p. 385 ff.; Kim & Mauborgne 2002	Gausemeier et al. 2014 p. 136ff.; Kim & Mauborgne 2002

Tabelle 1: Unterschiedliche Validierungsmethoden



<b>Creative techniques:</b> Brainstorming, Method 635, group discussions, Walt Disney Method	Schawel et al. 2014 p. 273-275.; Lindemann 2016 p. 743 ff.; Feldhusen et al. 2013 p. 354 ff.; Van Kleef et al. 2005.	Lindemann 2016 p. 743 ff.; Kobe 2007 p. 34.		
<b>Lead user method</b>	Lehnen 2017 S 114 ff., 175 ff.; Van Kleef et al. 2005.			
<b>Patent analysis</b>	Feldhusen et al. 2013 p. 350.; Kobe 2007; Daim et al. 2006; p. 34.; Breidert et al. 2002.	Feldhusen et al. 2013 p. 350.; Kobe 2007 p. 34.; Daim et al. 2006; Breidert et al. 2002		
<b>Projective methods:</b> Autodriving, image scales, TAT, cartoon- test, etc.	Gröppel-Klein & Königstorfer 2009 p. 542 ff.			
<b>Prototyping:</b> i.a. MVP, rapid prototyping	Albers 2017a p. 3.; Blank & Dorf 2014 p. 48 ff., 61 ff., 164 ff., 185 ff.; Exner et al. 2014; Ries 2011 p. 77, 93 ff.	Albers 2018 p. 3.; Albers 2017a p. 4.; Blank & Dorf 2014 p. 48 ff., 61 ff., 16 4ff., 185 ff.; Exner et al. 2014; Ries 2011 p. 77, 93 ff.; Lashin et al. 2013 p. 428.	Albers 2017a p. 3; Blank & Dorf 2014 p. 48 ff., 61 ff., 164 ff., 185 ff.; Ries 2011 p. 77, 93 ff.	
<b>Segmentation:</b> ABC analysis, portfolio models, scoring models, personas, tam sam som	Schawel et al. 2018 p. 15-17.; Denault 2018 p. 68.; Miskiewicz & Kozar 2011; Pruitt & Adlin 2010; Reinecke & Keller 2006 p. 262 ff.; Krafft & Albers 2000 p. 519.		Schawel et al. 2018 p. 15-17.; Denault 2018 p. 68.; Reinecke & Keller 2006 p. 262 ff.; Krafft & Albers 2000 p. 519.	
<b>Simulations</b>		Eigner et al. 2014 p. 97 ff.; Lashin et al. 2013 p. 411 ff., 441.		
<b>Scenarios</b>	Fink & Siebe 2016 p.259 ff., 266 ff.; Gausemeier et al. 2014 p. 47 ff.	Fink & Siebe 2016 p.259 ff.; Gausemeier et al. 2014 p. 47 ff.; Kobe 2007 p. 34.; Daim et al. 2006.	Fink & Siebe 2016 p.233 ff.; Gausemeier et al. 2014 p. 47 ff.	Fink & Siebe 2016 p.176 ff.; Gausemeier et al. 2014 p. 47 ff.
<b>Tracking/web analysis</b>	Blank & Dorf 2014 p. 22 f., 191 ff.; 220 ff.; Hassler 2010 p. 25 ff.; Lamla 2009 p. 797.			
<b>Surveys</b>	Blank & Dorf 2014 p. 8, 26.; Rubin & Chisnell 2008 p. 17.			
<b>Virtual reality, virtual prototyping, augmented reality</b>	Burke 2018 p. 70 ff.; Gausemeier et al. 2015; Backhaus et al. 2014 p. 61 ff.; Exner et al. 2014; Ma et al. 2011 p. 10 ff.	Gausemeier et al. 2015; Backhaus et al. 2014 p. 61 ff.; Ma et al. 2011 p. 10 ff.		

Tabelle 1 (Fortsetzung):

Unterschiedliche Validierungsmethoden

## Methode - Studie

Die Relevanz der Faktoren Kunden/Markt, Sektor/Wettbewerb, Technologie, Wirtschaft, Politik und allgemeines Umfeld wurde durch die Expertenbefragung bestimmt. Sie wurden ausgewählt, da sie in der Literatur oft mit Szenario-Entwicklung assoziiert werden (Gausemeier und Plass 2014). Für die Bewertung wurde eine nummerierte Likert-Skala mit fünf Punkten (0 = keine Relevanz – 4 = sehr relevant) verwendet. 58 Prozent der Teilnehmer arbeiten in der Produktentwicklung. Die Zeit von der Idee bis zur Markteinführung betrug bei 54 Prozent der Fälle weniger als drei Jahre. Für die Bewertung wurden zwei statistische Methoden angewandt: Der Kolmogorov-Smirnov-Test (Schäfer 2009) und der Wilcoxon-Test (Schwarz und Bruderer Enzler 2018).

## Ergebnisse - Studie

Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigte, dass keines der Muster normalverteilt ist. Der Wilcoxon-Test (siehe Abbildung 2) liefert folgende Ergebnisse über die Relevanz:

1. Kunde/Markt (5) (primäres Umfeld)
2. Sektor/Wettbewerb (2), Technologie (2) (sekundäres Umfeld)
3. Politik (-2), Allgemeines Umfeld (-2) (ausgeschlossen)
4. Wirtschaft (-5) (ausgeschlossen)

## 7 Szenariobasierte Validierung und experimentelle Anwendung

Im Folgenden wird die szenariobasierte Validierung von Produktprofilen vorgestellt und im Rahmen einer experimentellen Anwendung an einer Pflanzenpflege-App durchgeführt.

### Schritt 1 – Konsistenzanalyse

Der Nutzen für Kunden, Anwender und Anbieter muss durch eine Konsistenzanalyse überprüft werden (siehe Abbildung 3).

Im Fall der Pflanzenpflege-App sind die Kunden gleichzeitig Anwender, so dass das Leistungsprofil zwei Gruppen beinhaltet – Anbieter und Kunde bzw. Anwender.

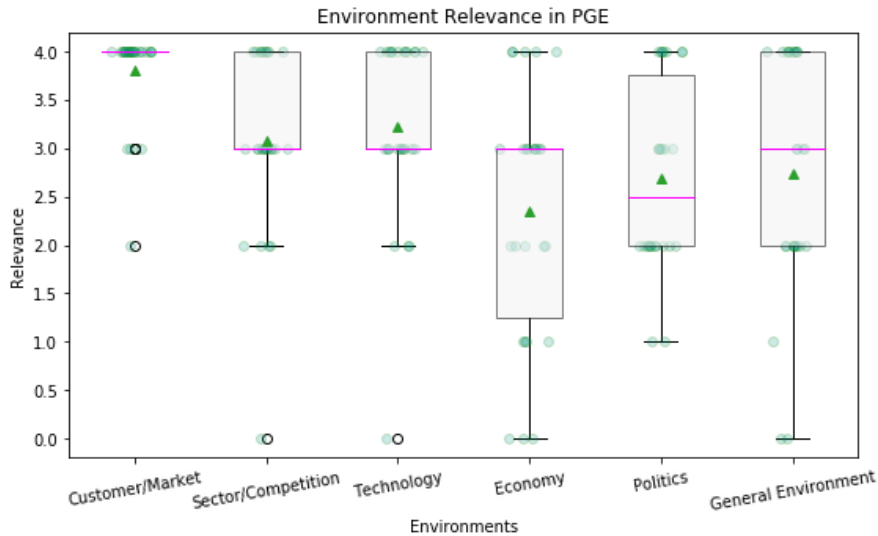


Abbildung 2: Studienergebnisse in Boxplot-Darstellung

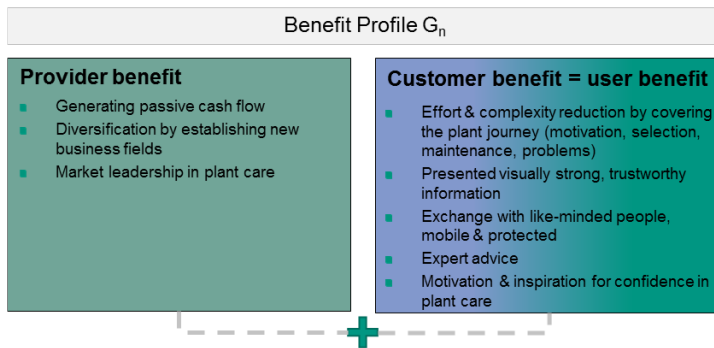


Abbildung 3: Nutzen für Kunden, Anwender und Anbieter (Konsistenzanalyse)

## Schritt 2 – Produktprofilvariante und einflussreiche Komponenten

Zunächst ist die Produktprofilvariante auszuwählen. Als Nächstes müssen relevante einflussreiche Elemente identifiziert und in Elemente des Umfelds (nicht beeinflussbare Variablen) und lenkende Elemente (beeinflussbare Variablen) aufgeteilt werden, um klare Produktprofilstrategien ableiten zu können (Voraussetzung: konstante Ergebnisse) (Fink und Siebe 2016). Auf

Grundlage der Ergebnisse aus Teil 4 wird das Produktprofilschema ausgewählt.

### Schritt 3 – Beeinflussende Faktoren, Schlüsselfaktoren und Entwicklung von Projektionen

Als Erstes muss der Zeithorizont festgelegt werden. Danach werden beeinflussende Faktoren durch leitende Elemente und Elemente des Umfelds (siehe Tabelle 2) sowie durch das primäre und das sekundäre Umfeld identifiziert.

Element	Categorization		Influence factor
Product profile claim	Steering element	▲ Later product profile scenarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>Product claim</li> </ul>
Initial product description	Steering element		<ul style="list-style-type: none"> <li>Information &amp; Technology Offerings</li> <li>Communication structure</li> </ul>
Use case	Steering element		<ul style="list-style-type: none"> <li>Plant care support</li> </ul>
Provider benefit	Environment element	▼ Later environment scenarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>Market leadership in plant care</li> <li>Passive income</li> <li>Diversification</li> </ul>
Customer benefit = User benefit	Environment element		<ul style="list-style-type: none"> <li>Attitude towards plant care</li> <li>Information access</li> <li>Plant health</li> <li>Community</li> </ul>
Competition	Environment element		<ul style="list-style-type: none"> <li>Competitive strength</li> <li>Positioning of the competition</li> </ul>
Demand	Environment element		<ul style="list-style-type: none"> <li>Market potential</li> <li>Global accessibility</li> </ul>
Boundary conditions	Environment element		<ul style="list-style-type: none"> <li>Climate change</li> </ul>
Technology	Additional influencing factors from secondary environment		<ul style="list-style-type: none"> <li>Technical devices</li> <li>Biotechnology</li> </ul>

Tabelle 2: Relevante Elemente, Kategorisierung und beeinflussende Faktoren (Pflanzenpflege-App)

Die Schlüsselfaktoren werden durch ein Dynamik-/Relevanz-Raster (siehe Abbildung 4) festgestellt. Die Zahl der Schlüsselfaktoren muss festgelegt werden: 15-20 bei 100 (Gausemeier und Plass 2014). Schließlich müssen die Dimensionen bestimmt werden. Als Nächstes werden die Projektionen als Ergebnis einer Kombination aus Exemplaren der Dimension pro Schlüsselfaktor entwickelt.

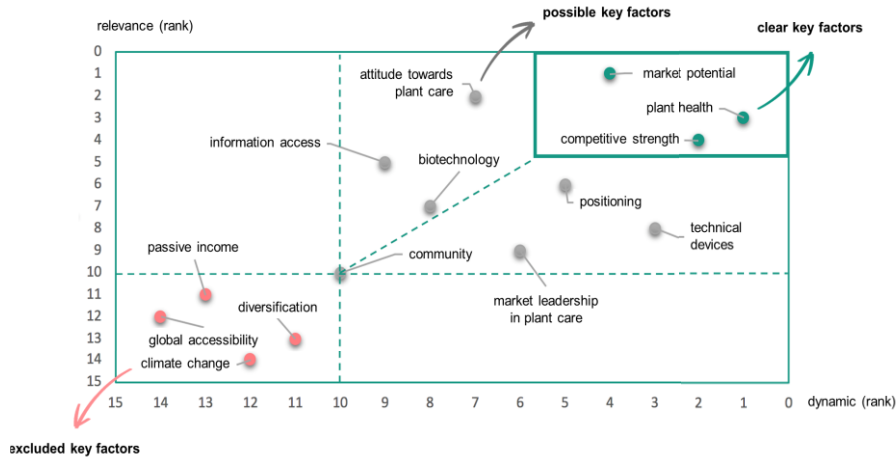


Abbildung 4: Bestimmung der Schlüsselfaktoren durch das Dynamik-/Relevanz-Raster (Pflanzenpflege-App)

In diesem Fall wurden ein Zeithorizont von 5 Jahren gewählt (IT Industrie) sowie zwei Faktoren für die Umwelttechnologie hinzugefügt. Die Anzahl der Schlüsselfaktoren für die Umweltszenarien ist auf 10 festgelegt.

#### Schritt 4 – Morphologische Bildung von Produktprofilen und Umweltszenarien

Produktprofil- und Umweltszenarien werden mit Hilfe einer morphologischen Matrix auf Grundlage der Projektionen von leitenden Elementen und Elementen des Umfelds erstellt. In diesem Fall wurden zwei Schlüsselfaktoren gepaart (siehe Abbildung 5) und die Zahl der Szenarien auf 11 begrenzt (Zahl in Klammern = Zahl der Untervarianten).

Die Umweltszenarien wurden analog entwickelt. Ihre Zahl wurde auf sechs festgelegt. Anschließend werden die Szenarien wie folgt in der morphologischen Matrix gebildet: (1) Zwei thematische Projektionen werden festgelegt (2) Die Projektionen werden ergänzt (3) Konsistente Projektionen werden hinzugefügt (4) Produktprofil- und Umweltszenarien werden unabhängig voneinander erstellt

		Key factor: Plant care support			
		Projektion A „Casual Planting“ Focus of product in plant care support is on casual users	Projektion B „Full Planting“ Both casual users and enthusiasts are supported in their plant care by the product	Projektion C „Alternative Planting“ The product supports neither casual users nor enthusiasts, but an alternative target group	Projektion D „Sophisticated Planting“ Focus of product is on supporting plant care for enthusiasts
Key factor: Product Claim	Projektion A „All for one target group“ Target group targeting is sharp and the coverage of the entire plant journey is high (motivation, purchase advice, care, problems)	Full Casual (3)			Full Sophisticated
	Projektion B „The full range“ Target group targeting is broad and the coverage of the entire plant journey is high (motivation, purchase advice, care, problems)			Full Alternative	
	Projektion C „Specialization for a target group“ Target group targeting is sharp and the degree of coverage of the entire Plant journey is low	Specialized Casual (2)		Specialized Alternative	Specialized Sophisticated
	Projektion D „Specialization for all“ Target group targeting is broad and only specific parts of plant journey are supported		Specialized Casual & Sophisticated (2)		

Abbildung 5: Themen der Produktprofilszenarien

## Schritt 5 – Validierung von Produktprofilen mit Hilfe von Produktprofilszenarien und Umweltszenarien

Die Produktprofilszenarien werden in zwei Varianten mit den Umweltszenarien verglichen: (1) Validierung auf Szenarioebene; Produktprofil- und Umweltszenarien werden in ihrer Gesamtform betrachtet; höchstes Validierungsniveau; Referenzproduktprofil wird einbezogen (siehe Abbildung 7, roter Kasten) (2) Validierung auf Projektionsebene; Projektion wird mit dem gesamten Umweltszenario verglichen (siehe Abbildung 6). Die Bewertung der Eignung basiert für beide Varianten auf einer Skala von -2 (-) bis 2 (++)

Die Kombination der Produktprofil Szenarien Full Casual 2, Specialized Casual 1 und Specialized Alternative wurde als eine zukunftsichere Produktprofilstrategie ausgewählt.

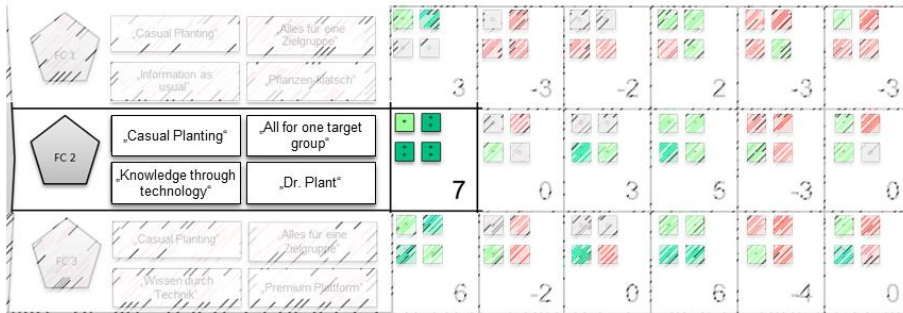


Abbildung 6: Beispielhafte Validierung des Produktprofils Full Casual (2) im ersten Umweltszenario (Variante 2)



Abbildung 7: Robuste Produktprofilstrategie

## 8 Fazit

Dieses Projekt trägt zur Erweiterung des aktuellen Forschungsstandes bei, indem es demonstriert, wie Produktprofile mit Hilfe der Szenariotechnik methodisch validiert werden können. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist die, dass das Umfeld Kunde/Markt das wichtigste Umfeld in Produktentwicklungsprozessen ist. Diese Arbeit ermöglicht ein erstes Verständnis für die Validität eines Produktprofils, indem sie die beeinflussenden Faktoren einschließlich ihrer Beziehungen untereinander durch ein initiales Referenzmodell beschreibt. Damit werden die meisten dieser Faktoren im Produktprofilschema im Verhältnis zu anderen Produktprofilvarianten betrachtet.

## 9 Ausblick

Die Ergebnisse der Studie haben einige Auswirkungen auf Theorie und Praxis. Das für die Validität der Produktprofile geschaffene Verständnis bietet eine Grundlage für weitere Forschungen auf diesem Gebiet. Dafür ist aber eine Beurteilung des Verständnisses durch weitere empirische Forschung notwendig. Anschließend kann ein verifiziertes Grundverständnis als Ausgangspunkt für die Optimierung von bestehenden Beschreibungsvarianten für Produktprofile genutzt werden. Weitere Forschungsgebiete ergeben sich aus der Notwendigkeit, Ergebnisse von Prognosen zu objektivieren, die aus dem Bedarf für konstante und objektive Ergebnisse resultiert.

## Literaturverzeichnis

- Albers, A. (2010): Five hypotheses about engineering processes and their consequences. In: Proceedings of the TMCE 2010.
- Albers, A.; Heimicke, J.; Walter, B.; Basedow, G. N.; Reiß, N.; Heitger, N. et al. (2018): Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. In: 28th CIRP Design Conference 2018.
- Albers, A.; Rapp, S.; Birk, C.; Bursac, N. (2017a): Die Frühe Phase der PGE–Produktgenerationsentwicklung. In: Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung.
- Albers, Albert; Bursac, Nikola; Rapp, Simon (2017b): PGE–Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. In: Forschung im Ingenieurwesen 81 (1), S. 13–31.
- Coskun Samli, A.; Weber, Julie Ann E. (2000): A theory of successful product breakthrough management: learning from success. In: Journal of Product & Brand Management 9 (1), S. 35–55.



- Daim, Tugrul U.; Rueda, Guillermo; Martin, Hilary; Gersdri, Pisek (2006): Forecasting emerging technologies: Use of biblio-metrics and patent analysis. In: Technological forecasting and social change 73 (8), S. 981–1012.
- Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich (2013): Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produkt-entwicklung: Springer-Verlag.
- Fink, Alexander; Siebe, Andreas (2016): Szenario-Management: von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen: Campus Verlag.
- Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph (2014): Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2., überarb. Aufl. München: Hanser.
- Goldenberg, Jacob; Lehmann, Donald R.; Mazursky, David (2001): The Idea Itself and the Circumstances of Its Emergence as Predictors of New Product Success. In: Management Science 47 (1), S. 69–84. DOI: 10.1287/mnsc.47.1.69.10670.
- Hult, Jan (1992): The Itera plastic bicycle. In: Social studies of science 22 (2), S. 373–385.
- Kneuper, Ralf (1992): Validation und Verifikation von Software durch symbolische Ausführung. In: Testen, Analysieren und Verifizieren von Software: Springer, S. 155–167.
- Meißner, Martin; Decker, Reinhold; Pfeiffer, Jella (2010): Ein empirischer Vergleich der Prozessaufzeichnungsmethoden. In: Marketing ZFP 32 (3), S. 135–145.
- Meissner, Philip; Wulf, Torsten (2013): Cognitive benefits of scenario planning: Its impact on biases and decision quality. In: Technological forecasting and social change 80 (4), S. 801–814.
- Schäfer, T. (2009): Methodenlehre II. Verfahren für ordinalskalierte Daten. Online verfügbar unter <https://www.tu-chemnitz.de/hsw/psychologie/professuren/method/homepages/ts/methodenlehre/meth6.pdf>, zuletzt geprüft am 24.10.2018.
- Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H. (2018): Wilcoxon-Test. Universität Zürich. Online verfügbar unter [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss/unterschiede/zentral/wilcoxon.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/wilcoxon.html), zuletzt geprüft am 24.10.2018.
- Siebe, Andreas (2018): Die Zukunft vorausdenken und gestalten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

## **Kontakt**

Florian Marthaler, M.Sc.  
Vincent Kutschera, M.Sc.  
Jonas Reinemann, M.Sc.  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers  
IPEK – Institut für Produktentwicklung  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 10  
76131 Karlsruhe  
*[www.ipek.kit.edu](http://www.ipek.kit.edu)*

Dr.-Ing. Nikola Bursac  
TRUMPF GmbH + Co. KG  
Johann-Maus-Str. 2  
71254 Ditzingen  
*[www.trumpf.com](http://www.trumpf.com)*

# Vergleich von Produktinnovationsarten – Worin die Unterschiede wirklich begründet liegen

Jonas Heimicke, Valentin Zimmermann, Monika Klippert, Markus Spadinger und Albert Albers

## 1 Einleitung

Seit jeher treibt die Motivation, erfolgreiche Produkte – Innovationen – am Markt zu vertreiben, die wirtschaftliche Produktentwicklung von Unternehmen an (Schumpeter 1912). Dabei sind neben einer erfolgreichen Einführung eines Produktes in den Markt, ein relevantes Produktprofil (Bedarfssituation am Markt) sowie die technische oder serviceseitige Lösung dieses Bedarfs durch eine Neuerung (Invention) notwendige Bestandteile einer Innovation (siehe Abbildung 1) (Albers et al. 2018a).

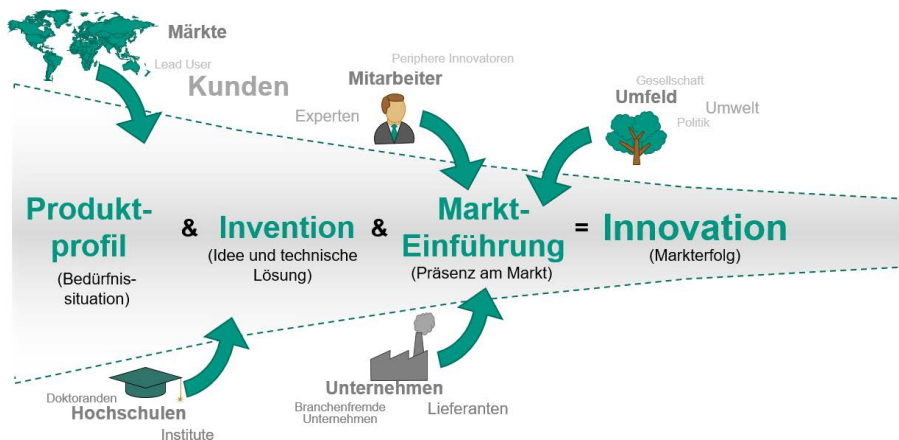


Abbildung 1: Bestandteile einer Innovation im Innovationstrichter nach (Albers et al. 2018a)

Allerdings stellt das Kreieren einer Innovation kein triviales Unterfangen dar, sondern unterliegt vielmehr dem kontinuierlichen Umgang mit Unsicherheiten (Bennett & Lemoine 2014). Dies führt dazu, dass der Prozess in der Produktentwicklung nicht ausreichend planbar und infolgedessen äußerst stör anfällig ist (Albers et al. 2019a). Um Entwicklerteams jedoch bestmöglich im Innovationsprozess durch geeignete Vorgehensweisen zu unterstützen, wurde eine Vielzahl an Prozessmodellen entwickelt (Wynn & Clarkson 2018).

In der Literatur haben sich unterschiedliche Arten von Innovationen herauskristallisiert, die, insbesondere hinsichtlich der durch sie hervorgerufenen Marktveränderungen, unterschieden werden können (Disselkamp 2005). Diese Unterscheidung ist ausschließlich retrospektiv durchführbar. Zudem existiert keine systematische Betrachtung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den einzelnen Innovationsarten auf Basis der Informationen, die für die Entwicklung der Produkte notwendig sind. Im vorliegenden Beitrag erfolgt dieser Vergleich anhand dreier Beispiele mit jeweils drei Produkten.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Einführung Innovation

Disselkamp (2005, S. 21) führt verschiedene Innovationsarten – Prozessinnovation, marktmäßige Innovation, strukturelle Innovation, kulturelle Innovation und Produktinnovation – in Abhängigkeit des Innovationsbereichs ein. Im vorliegenden Beitrag liegt der Fokus auf der Produktinnovation. Neben Innovationsauslösern und dem Innovationsgrad lassen sich Innovationen in der Literatur zudem als inkrementell oder radikal hinsichtlich des Veränderungsumfangs einteilen (Granig & Perusch 2012, S. 24). Allerdings existiert keine einheitliche Definition radikaler oder inkrementeller Innovationen (McDermott 2002), was zu den Versuchen führt, die Radikalität von Innovationen zu messen (Dahlin & Behrens 2005). Zudem ist die Beurteilung, ob eine Innovation inkrementell oder radikal ist, lediglich retrospektiv möglich. Während eine inkrementelle Innovation kleinschrittige Neuerungen darstellt, die auf bestehenden Technologien im gleichen Anwendungsbereich basieren, werden bei radikalen Innovationen bestehende Technologien in neue Anwendungsfelder gebracht. Hierdurch beeinflussen sie unmittelbar zukünftige

Entwicklungen in diesen Kontexten. (Dahlin & Behrens 2005) Beispiele hierfür sind das erste Notebook (Desktop PC in einer Aktentasche) (Ginzo et al. 1986), die erste Smartwatch (Handy in der Uhr) oder das erste Automobil (Verbrennungsmotor in einer Kutsche) (siehe Abbildung 2).

Neben inkrementellen und radikalen Innovationen rücken insbesondere seit dem Jahr 2010 sogenannte frugale Innovationen in den Fokus von Unternehmen (Gewald et al. 2012). Diese Art der Innovation wird für den Absatz in Schwellenländern kreiert und zeichnet sich dadurch aus, dass sie lediglich bestimmte Grundbedürfnisse befriedigt, auf jegliche Begeisterungsmerkmale aus westlicher Sicht verzichtet und zu einem möglichst niedrigen Preis zu erwerben ist (Zeschky et al. 2011).



Abbildung 2: Beispiele für bestehende Technologien in neuen Anwendungsfällen

## 2.2 Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Die Unschärfe in der Beschreibung von Innovationsvorhaben auf Basis bestehender Theorien des Innovationsmanagements (Henderson & Clark 1990) oder der gängigen Praxis der Konstruktionsmethodik (Pahl et al. 2007) wird durch das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach Albers (2015) aufgelöst. Dieses besagt, dass alle Produkte in Generationen auf


Basis eines Referenzsystems entwickelt werden. Das Referenzsystem beinhaltet Referenzelemente (bestehende Produkte, Lösungen, Prinziplösungen aus dem eigenen Unternehmen, Wettbewerb, anderer Branchen oder der Forschung). Diese gehen durch ihre Übernahme, Veränderung ihrer Gestalt oder ihres Prinzips in die neue Generation ein. Dabei wird das Referenzsystem im Laufe eines Entwicklungsprozesses kontinuierlich erweitert, Referenzelemente systematisch gesucht oder ersetzt. Durch das Modell der PGE ist eine vollständige, quantitative Beschreibung des Neuentwicklungsanteils möglich. (Albers et al. 2019b)

### 2.3 Modellierung von Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen

Die schnelle Umsetzung von Innovationen und die flexible Reaktion auf neue Anforderungen sind entscheidende Faktoren, die es ermöglichen sich gegenüber Wettbewerbern einen entscheidenden Vorteil zu verschaffen. Der Minimum Viable Product (MVP) Gedanke setzt sich genau dieses zum Ziel (Lenarduzzi & Taibi 2016). Durch sich stetig wiederholende Kunden- und Anwenderstudien wird das Produkt kontinuierlich angepasst, um die Bedürfnisse der künftigen Kunden und Nutzer bestmöglich zu befriedigen. Dieses Vorgehen verhindert die Entwicklung von Produkten, die nicht den Bedürfnissen und Interessen des Kunden und Nutzers entsprechen.

Diesen Ansatz greifen viele weitere Methoden auf, unter anderem auch die Methode der User Stories. Dabei beschreibt eine User Story vom Kunden gestellte Anforderungen, die einen deutlichen Mehrwert für den Kunden liefern und somit für ihn von entscheidender Bedeutung sind. User Stories sind im Vergleich zu Use Cases eher unkonkret und haben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. (Wirdemann & Mainusch 2017).

Wie in Abbildung 3 dargestellt integriert Albers (2018b) weitere Aspekte bezüglich des Produktes, Marktes und Rahmenbedingungen und fasst diese in einem sogenannten Produktprofil zusammen. Das Produktprofil nimmt die technische Umsetzung des Produkts nicht vorweg, sondern beinhaltet eine Beschreibung bestehender Referenzsystemelemente, möglicher Use Cases und Anforderungen und somit wichtige wertschöpfende Produkteigenschaften. Im Vergleich zu anderen Methoden steht im Produktprofil neben dem Kunden- auch der Anwendernutzen und der Anbieternutzen im Fokus. (Albers et al. 2018b)

<b>Produktclaim</b> <i>Wir brauchen ein Produkt, das...</i>		<b>Bild</b>   <small>Link für zusätzliche Informationen</small>
<b>Initiale Produktbeschreibung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Produkteigenschaften</li> <li>Hauptfunktionen / Kundefunktionen</li> <li>USP (Alleinstellungsmerkmal)</li> <li>...</li> </ul>		
<b>Referenzsystem</b> Referenzelemente aus <ul style="list-style-type: none"> <li>Vorgänger Produktgeneration</li> <li>Eigenem Unternehmen</li> <li>Gleicher/ anderer Branche</li> </ul>	<b>Use Cases</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>In welchem Kontext wird dieses Produkt eingesetzt?</li> <li>Wie interagiert der Kunde / Nutzer mit dem Produkt?</li> <li>...</li> </ul>	
<b>Anbiaternutzen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Strategischer Einsatz</li> <li>Passt zu Unternehmensphilosophie, Marke, ...</li> <li>Erweiterung Produktportfolio</li> <li>Geschäftsmodell</li> <li>Ressourcen</li> <li>Nutzbare Kernkompetenzen</li> </ul>	<b>Kundennutzen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Customer Pain – das Problem aus Sicht eines Kunden</li> <li>Wie wird das Produkt dem Kunden nutzen?</li> <li>Zielgruppe / Marktsegment</li> </ul>	<b>Anwendernutzen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>User Pain – das Problem aus Sicht eines Anwenders</li> <li>Wie wird das Produkt dem Anwender nutzen?</li> <li>Zielgruppe</li> </ul>
<b>Wettbewerbssituation</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Wettbewerb</li> <li>Marktanteile</li> <li>Patentsituation</li> <li>Konkurrierende Produkte</li> </ul>	<b>Nachfrage</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Beschreibung des Kunden / Anwender</li> <li>Märkte</li> <li>Marktpotential / Marktgröße</li> <li>Trends / Zukunftsszenarien</li> </ul>	
<b>Validierung des ... durch</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Z.B. des Customer Pain und User Pain durch Interviews</li> <li>Z.B. der Patentsituation durch eine Patentanalyse mit Fokus auf Europa</li> <li>...</li> </ul>		
<b>Rahmenbedingungen / Einschränkungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gesetzliche Rahmenbedingungen</li> <li>Standards</li> <li>Strategische Partnerschaften</li> <li>...</li> </ul>		

Vergleich von Produktinnovationsarten – Worin die Unterschiede wirklich begründet liegen

Abbildung 3: Das Produktprofil Scheme nach Albers et al. 2018b

### 3 Forschungsbedarf

Derzeit existiert keine systematische Beschreibung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Produktinnovationsarten, die die jeweils verwendeten Informationen zur Bedarfsermittlung sowie verwendete Referenzsystemelemente diskutiert. Um zum einen ein Verständnis darüber zu erlangen, hinsichtlich welcher Informationen sich die in der Literatur definierten Produktinnovationsarten unterscheiden und zum anderen zu diskutieren, ob eine begriffliche Unterscheidung dieser notwendig ist, wird im vorliegenden Beitrag die folgende Forschungsfrage beantwortet:

- Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede weisen die Produktprofile gängiger Produktinnovationsarten hinsichtlich der durch sie befriedigten Bedarfssituation und dem ihnen zu Grunde liegenden Referenzsystem auf?

Auf Basis eines Verständnisses aus der Literatur hinsichtlich der Unterscheidungsmerkmale der Produktinnovationsarten *frugal*, *inkrementell* und *radikal* werden für die jeweiligen Innovationsarten retrospektiv Produktprofile gebildet (Basedow et al. 2018) und auf Basis dessen deren Bedarfsmodellierung analysiert. Diese Analyse wird mithilfe von drei Beispielen mit jeweils drei Produkten derselben Produktkategorie durchgeführt. So werden allgemeingültige und über die unterschiedlichen Innovationsarten hinweg konstante Eigenschaften der Innovationsarten identifiziert. Zudem erfolgt eine Analyse der Informationsebenen, innerhalb welcher sich die Innovationsarten unterscheiden lassen. Des Weiteren wird auf Basis von Recherchen das jeweilige Referenzsystem gebildet, das den jeweiligen Produkten in der Entwicklung zu Grunde lag.

### 4 Ergebnisse

#### 4.1 Vorstellung der Beispiele

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurden drei verschiedene Beispiele ausgearbeitet, die sich wiederum aus drei verschiedenen Produkten zusammensetzen, von denen jeweils eines der Literatur zufolge eine frugale Innovation bzw. eine radikale Innovation bzw. eine inkrementelle Innovation darstellt. Das erste Beispiel liegt innerhalb der Automobilindustrie. In diesem Beispiel wurde der Tata Nano als frugale Innovation betrachtet, der Porsche 997 als



inkrementelle Innovation und der Tesla Model S als radikale Innovation. Die Informationscluster der verschiedenen Produktprofile sind in der nachstehenden Abbildung aufgeführt.

Innovationsart	Frugale Innovation	Inkrementelle Innovation	Radikale Innovation
Produkt	Tata Nano	Porsche 911	Tesla Model S
<b>Produktelaim</b>	Wir brauchen ein Produkt, das es uns ermöglicht in Schwellenländern das Bedürfnis nach Individualmobilität durch einen PKW zu befriedigen.	Wir brauchen ein Produkt, das Kunden ein sportliches Fahrerlebnis bietet, dabei einen neuen Maßstab im Feld der Sportwagen setzt und gleichzeitig die spürbare Porscheidentität aufweist.	Wir brauchen ein Produkt, das den Markt der Sportwagen nicht weniger als revolutioniert, dadurch dass es sämtliche Eigenschaften eines Sportwagens aufweist, auf einen elektrischen Antriebsstrang zurückgreift und somit den ökologischen Bedürfnissen der Kunden gerecht wird.
<b>(Initiale) Produktbeschreibung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer Preis (Aussparen von Komfort- und Sicherheitselementen)</li> <li>- verbrauchsarmer Motor</li> <li>- Kofferraumklappe gegen Aufpreis</li> <li>- 4-Gang Getriebe</li> <li>- Trommelbremse</li> <li>- Viele Kunststoffteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückleuchte, Blinker, Bremslichter, Tagfahrlicht als LED</li> <li>- Direct Fuel Injection - Motoren</li> <li>- Optional: Doppelkupplungsgetriebe</li> <li>- Lang übersetzter 7. Gang</li> <li>- 1. Touchscreen-Display</li> <li>- Runde Frontscheinwerfer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrischer Antrieb</li> <li>- Einstufiges (Zweistufiges) Getriebe</li> <li>- "CO2-neutrales", sportliches Fahren</li> <li>- Reichweite ~350 km</li> </ul>
<b>Elemente des Referenzsystems</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zweirad-Getriebe</li> <li>- Klebetechnik</li> <li>- Bosch: Elektronikzusatz</li> <li>- Mahle: Nockenwelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porsche 996, 993</li> <li>- Getriebe 919/ Porsche 956/962</li> <li>- Apple iPad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Loutse Elise - (Fahrzeugrahmen, Karosserieform,...)</li> <li>- Lithium-Ionen-Akkus (Laptops)</li> </ul>
<b>Use-Cases</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahren in Entwicklungsländern mit entsprechender Infrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sportliches Fahren zur Fortbewegung im Alltag</li> <li>- Fahren auf der Rennstrecke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sportliches Fahren</li> <li>- emissionsneutrale Fortbewegung in einem PKW</li> </ul>
<b>Anbieternutzen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erschließen eines neuen Marktsegmentes</li> <li>- Großer Absatzmarkt in Indien, bisher fast ausschließlich Zweirad getrieben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sichern der Bestandskunden des Porsche 911</li> <li>- Rückgewinnen von Kunden durch traditionelle Scheinwerferform</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erschließen eines neuen Marktsegmentes</li> <li>- First-Mover im Feld der nachhaltigen Mobilität im PKW-Segment</li> </ul>
<b>Kundennutzen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunde und Anwender sind gleich</li> <li>- Erschwingliches PKW</li> <li>- Sicheres Fortbewegen in gefährlichem Straßenverkehr</li> <li>- Sicheres Fortbewegung im KFZ statt Motorrad, Roller, etc</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unternehmen als Kunde:</li> <li>- Ausstattung der Belegschaft mit einem Firmenfahrzeug</li> <li>- Statussymbol und Prestige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unternehmen als Kunde:</li> <li>- Ausstattung der Belegschaft mit einem Firmenfahrzeug</li> <li>- Statussymbol und Prestige</li> </ul>
<b>Anwendernutzen</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Statussymbol und Prestige</li> <li>- Sportliches Fahrerlebnis</li> <li>- Luxus-Erlebnis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prestige (Nachhaltigkeitsbewusstsein kundengeben)</li> <li>- Sportliches Fahrerlebnis</li> <li>- Luxus-Erlebnis</li> <li>- Einsparen von Kraftstoff</li> </ul>
<b>Wettbewerbs-situation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zweirad-Hersteller</li> <li>- Bajaj Qute</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es gibt einige Wettbewerber im Bereich Premium-Fahrzeuge (Ferrari, Lamborghini, Mercedes etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstes serienfähiges Elektrofahrzeug</li> </ul>
<b>Nachfrage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Märkte: Entwicklungsländer mit Fokus Indien</li> <li>- Fahrzeugs in Indien noch nicht stark verbreitet</li> <li>- Personen des unteren Marktsegmentes</li> <li>- Kein Werkstättenetzwerk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Märkte: Industrieländer</li> <li>- Personen des oberen Marktsegmentes</li> <li>- sportlich, ambitionierte Fahrer</li> <li>- Kunden mit Wunsch nach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Märkte: Industrieländer</li> <li>- Personen des oberen Marktsegmentes</li> <li>- Kunden, die dem "Öko-Trend" folgen</li> <li>- Kunden, die Verknappung fossiler Brennstoffe entgegen wirken möchten</li> </ul>

Abbildung 4: Vergleich der Innovationsarten anhand dreier Produkte am Beispiel PKW

Das nächste Beispiel entstammt der Branche der Rauchwarnmelder. Die betrachteten Produkte sind der Longsing Smoke Detector als frugale Innovation, der Hekatron Genius Plus X als inkrementelle Innovation und Pyrotector Typ 105 als radikale Innovation. Die entsprechenden Produktprofile sind in Abbildung 5 dargestellt.

Innovationsart	Frugale Innovation	Inkrementelle Innovation	Radikale Innovation
Produkt	Longsing Smoke Detector	Hekatron Genius Plus X	Rauchwarnmelder Typ 105
<b>Produktclaim</b>	Wir brauchen ein Produkt, das ein Grundmaß an Funktionalität erfüllt und als Warnmelder dient, um auch Personen mit beschränkten finanziellen Mitteln ein gesteigertes Sicherheitsgefühl zu bieten.	Wir brauchen ein Produkt, das einen neuen Maßstab der Sicherheitstechnik setzt, indem sämtliche Grundfunktionen von Rauchwandmeldern optimiert werden und eine Vernetzung dieser in einer Wohnung ermöglicht wird, sodass im Falle eines Brandes die Bewohner auch in anliegenden Räumen alarmiert werden und sich in Sicherheit bringen können.	Wir brauchen ein Produkt, das es uns ermöglicht, kostengünstig, sicher und zu verlässig Rauch in Wohnräumen zu detektieren, und damit Kunden vor Bränden zu warnen.
<b>(Initiale) Produktbeschreibung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spannungsversorgung über 9V Blockbatterie</li> <li>- ein fache Messkammer</li> <li>- ein fache Elektronik</li> <li>- kleines Kunststoffgehäuse</li> <li>- keine VdS-Anerkennung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Batterielauzeit 10 Jahre</li> <li>- Schnittstelle für Funkmodul, zur Vernetzung smarterer Genius Plus X</li> <li>- Datenübertragung zum Smartphone</li> <li>- Verschmutzungskompensation</li> <li>- VdS Anerkennung, Q-Label</li> <li>- anmutendes Design</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Streulichtmessprinzip</li> <li>- Labyrinthring</li> <li>- Abstand Rauchabstand</li> <li>- Kunststoffgehäuse</li> </ul>
<b>Elemente des Referenzsystems</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lonosin LS-828-21P</li> <li>- 9V Batterieblock</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genius Plus</li> <li>- MTD 533</li> <li>- Tadiran High Energy Battery (3,6 V)</li> <li>- Cubus-Nivellierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cerberus (Ionisationsrauchwarnmelder)</li> <li>- Gokkappchen Melder</li> <li>- Tyndall-Effekt</li> </ul>
<b>Use-Cases</b>	- Heimrauchmelder für Wohnräume	- Heimrauchwarnmelder für Wohneinheiten mit mehr als einer Überwachungsstelle	- Rauchwarnmelder für Wohnräume
<b>Anbiaternutzen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Große Märkte mit geringer Konkurrenz</li> <li>- Viele potentielle Anwender</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicher der Bestandskunden</li> <li>- Langfristige Bindung der Kunden</li> <li>- Verkauf vieler Melder an einen Kunden durch Funkvernetzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- erstes Produkt auf europäischem Markt, das auf Streulichtprinzip zurückgreift</li> <li>- Kosteneinsparungen</li> </ul>
<b>Kundennutzen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherheitsgefühl der Mieter</li> <li>- Sicherheit der Immobilie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Installationsgeschäft</li> <li>- Servicegeschäft</li> <li>- Verkauf des Stiftungwarentestsiegers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deutlich geringerer Preis als Wettbewerbsprodukte</li> </ul>
<b>Anwendernutzen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherheitsgefühl</li> <li>- Warnung vor Brandgefahr</li> <li>- Schutz von Leben und Sachwerten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr hohes Sicherheitsgefühl</li> <li>- Warnung vor Brandgefahr</li> <li>- Schutz von Leben und Sachwerten</li> <li>- Kein/ wenig Aufwand (Batteriewechsel, Wartung, Austausch,...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sehr hohes Sicherheitsgefühl</li> <li>- Warnung vor Brandgefahr</li> <li>- Schutz von Leben und Sachwerten</li> <li>- Wegfall der radioaktiven Substanz im Melder</li> </ul>
<b>Wettbewerbs-situation</b>	- Auf dem chinesischen Markt gibt es aktuell kaum Konkurrenz, verschiedene Nationale Märkte werden häufig durch Zulassungen abgeschlossen	- Einige Wettbewerber im Markt der Rauchwarnmelder in Zentraleuropa	- Markt ist zu diesem Zeitpunkt durch Ionisationsmelder geprägt - Erster Rauchwarnmelder mit Streulichtprinzip
<b>Nachfrage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absatzmärkte Asien, Mittlerer Osten und Südamerika</li> <li>- Bedarf nach kostengünstigen Meldern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DACH - Märkte</li> <li>- Rauchwarnmelderpflicht in verschiedenen Bundesländern</li> <li>- Privatanwender</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Märkte: Industrieländer</li> <li>- Bedarf nach Meldern, die ohne radioaktive Substanz auskommen</li> <li>- Sicherheitsbedürfnis gegenüber Brandfällen</li> </ul>

Abbildung 5: Vergleich der Innovationsarten anhand dreier Produkte am Beispiel Rauchwarnmelder

Das dritte Beispiel entstammt der Mobilfunkbranche. Hier wurden das erste iPhone von Apple als radikale Innovation und das iPhone 7 als inkrementelle Innovation identifiziert. Das Nokia 1100 ist eine frugale Innovation. (Siehe Abbildung 6)

Innovationstyp	Frugale Innovation	Inkrementelle Innovation	Radikale Innovation
Produkt	Nokia 1100	Apple iPhone 7	Apple iPhone EDGE
Produktskizze	Wir brauchen ein Produkt, das Menschen in 8-9 Ländern mit schlechter Stromversorgung und extremen Witterungsbedingungen eine kostengünstige und stabile mobile Kommunikation ermöglicht.	Wir brauchen ein Produkt, das die bestehenden Funktionalitäten zur mobilen Kommunikation nutzt und seine Bedienung durch eine erhöhte Anwendungsperformance verbessert.	Wir brauchen ein Produkt, das die Funktionen eines Telefons und Computers integriert und durch eine intuitive Bedienbarkeit den Anwendungscomfort sowie die Bedienvielfalt der mobilen Kommunikation steigert.
(Initiale) Produktbeschreibung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringer Kaufpreis</li> <li>- lange Akkulaufzeit</li> <li>- telefonieren, SMS senden, Alarmfunktion</li> <li>- Textnachrichten in Hindi</li> <li>- integrierte Taschenlampe/Funktion</li> <li>- rutschfest und staubdichter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bessere Performance als Vorgängermodelle</li> <li>- helleres Display als Vorgängermodell</li> <li>- doppelte Speicherkapazität</li> <li>- Integration von 3D-Touch (bereits im iPhone 6 enthalten)</li> <li>- Force Touch bei Home-Button</li> <li>- spritzwassergeschützt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- USP: Intuitive Touch-Bedienung</li> <li>- APP-gesteuert</li> <li>- dünn und leicht im Vergleich zu Referenzprodukten</li> <li>- internetfähiges Mobiltelefon</li> <li>- großes Display</li> </ul>
Elemente des Referenzsystems	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monochromes Display (Nokia 6250)</li> <li>- Betriebssystem Symbian Series 30</li> <li>- Gehäusekomponenten (Format: Barren) aus Nokia 6250, 6250, 6510</li> <li>- 12er Tastatur aus den Reihen 6250, 6250, 6510</li> <li>- Akku BL-5C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- iPhone 6</li> <li>- iPhone 6s</li> <li>- Prozessor mit 4 Kernen</li> <li>- Force Touch (Apple Watch)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prozessor ARM 1176 (Samsung)</li> <li>- Multi-Touch-Screen (wurde seit 1962 entwickelt - Patent 2004)</li> <li>- Schreiben über eingetastete Tastatur</li> <li>- 2 integrierte Digitalkameras (erste Kamera integriert in Mobiltelefone 1969 - Camcass von Toshiba)</li> <li>- Lithium-Polymer-Akku</li> <li>- Aufbau Gehäuse Newton MessagePad 2000</li> <li>- erstes Smartphone: Nokia 9000 Communicator</li> </ul>
Use-Cases	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mobile Kommunikation via Anruf oder SMS in entlegenen Gebieten mit unregelmäßiger Stromversorgung</li> <li>- Nutzung der integrierten Taschenlampe als provisorisches Beleuchtungsmittel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Speichern großer Datenmengen</li> <li>- Nutzung von Anwendungen, die eine erhöhte Rechenleistung voraussetzen</li> <li>- Nutzung des Internets auf dem Smartphone (E-Mails, surfen, etc.)</li> <li>- Nutzung verschiedener Funktionen mit einem Gerät (telefonieren, SMS senden, Kamera, Kalender etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzung des Internets auf dem Smartphone (E-Mails, surfen, etc.)</li> <li>- Nutzung verschiedener Funktionen mit einem Gerät (telefonieren, SMS senden, Kamera, Kalender etc.)</li> </ul>
Anbietersutzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erschließung neuer Marktsegmente</li> <li>- keine zusätzlichen Services (Batterie, Wartung, etc.) notwendig</li> <li>- Geringe Entwicklungsaufwände</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Setzen neuer Performancestandards</li> <li>- Festlegen der Wettbewerbsposition</li> <li>- technologisch höchster Schritt zum kabellosen Smartphone</li> <li>- Einsatz neuer Technologien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Revolutionierung des Smartphone-Marktes</li> <li>- First Mover, Setzen von Standards</li> <li>- Aufbau von Stammkundenbelegschaft</li> </ul>
Kundennutzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kunde und Anwender des Produktes sind gleich</li> <li>- mobile Kommunikation zum kleinen Preis</li> <li>- Nutzung der integrierten Taschenlampe zur Kompensation des provisorischen Beleuchtungsmittels</li> <li>- robustes Mobiltelefon, keine Engpässe bei Einsatzstellen</li> <li>- Anwendung unter extremen Bedingungen (Staub, Monsun, ...)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unternehmen als Kunde:</li> <li>- Ausstattung der Belegschaft mit einem Mobiltelefon</li> <li>- keine Medienbrüche</li> <li>- Statussymbol</li> <li>- Statussymbol</li> <li>- mobile Konnektivität</li> <li>- steigende Erreichbarkeit über mehrere Kanäle (Telefon, SMS, soziale Netzwerke, etc.)</li> <li>- Anwendung in Bereichen, die spritzwassergefährdet sind</li> <li>- erhöhte Speicherkapazitäten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unternehmen als Kunde:</li> <li>- Ausstattung der Belegschaft mit einem Mobiltelefon</li> <li>- keine Medienbrüche</li> <li>- Statussymbol</li> <li>- Statussymbol</li> <li>- mobile Konnektivität</li> <li>- steigende Erreichbarkeit über mehrere Kanäle (Telefon, SMS, soziale Netzwerke, etc.)</li> <li>- erhöhte Funktionalität in einem Gerät</li> </ul>
Anwendersutzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Informationen verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Smartphone-Markt ist in die Lager iOS und Android aufgeteilt</li> <li>- Aus Asien drängen Geräte mit ähnlicher Funktionalität und Qualität zu geringeren Preisen auf den Markt</li> <li>- Es wird erwartet, dass der größte Konkurrent ein fates Smartphone am Markt einführen wird</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstes Smartphone mit Touch-Bedienung am Markt</li> </ul>
Wettbewerbs-situation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Informationen verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Smartphone-Markt ist in die Lager iOS und Android aufgeteilt</li> <li>- Aus Asien drängen Geräte mit ähnlicher Funktionalität und Qualität zu geringeren Preisen auf den Markt</li> <li>- Es wird erwartet, dass der größte Konkurrent ein fates Smartphone am Markt einführen wird</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstes Smartphone mit Touch-Bedienung am Markt</li> </ul>
Nachfrage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Märkte: Entwicklungsländer mit Fokus Indien</li> <li>- Personen des unteren Marktsegments</li> <li>- erschwerte Ersatzteilversorgung</li> <li>- Telefoninfrastruktur steckt in den Kinderschuhen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestandskundenmarkt (zwischen 15 und 25% des Smartphone-Marktes)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potenzielle Kunden: alle Personen, die ein Mobiltelefon besitzen</li> <li>- Szenario: Vernetzung, Digitalisierung, Internet of Things (IoT)</li> </ul>

Abbildung 6: Vergleich der Innovationsarten anhand dreier Produkte am Beispiel Mobiltelefon

## 4.2 Gemeinsamkeiten je Beispiel

Die in Kapitel 4.1 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich auf Basis der Recherche zu allen verglichenen Produkten die entsprechenden Produktprofile retrospektiv aber vollständig beschreiben lassen. Jedes Produkt weist ausreichend Informationen auf, um die innerhalb des Produktprofils geforderten Kategorien zu bedienen. Das Produktprofil besitzt somit seine Gültigkeit unabhängig von der in der Literatur identifizierten Art der Innovation. Betrachtet man die verschiedenen erarbeiteten Produktprofile innerhalb eines der definierten Beispiele, werden einige Gemeinsamkeiten ersichtlich. So befriedigen alle Produkte des Beispiels Rauchwarnmelder den Grundbedarf von *Sicherheit von Leben und Sachgütern*. Die anderen beiden Beispiele erfüllen die Bedarfe *mobile Kommunikation* bzw. *Individualmobilität*. Natürlich gilt es festzuhalten, dass es gewisse Abwandlungen dieses Grundbedarfes gibt. So geht mit dem Bedarf an Individualmobilität im Beispiel des Tesla Model S noch der Bedarf nach Komfort, Sportlichkeit oder Dynamik einher, wohingegen der Tata Nano lediglich das Mobilitätsbedürfnis selbst befriedigt. Weiter kann bei der Analyse der verschiedenen aufgestellten Produktprofile festgestellt werden, dass jedes der Produkte – sowohl frugale -, als auch inkrementelle - und radikale Innovationen – einen Anbieternutzen aufweist, der immer in einen monetären Vorteil des Anbieters mündet. So zielte Nokia mit der Entwicklung des 1100 darauf ab, durch geringe Entwicklungsaufwände ein Mobiltelefon bereitzustellen, dass sich für den Einsatz in Schwellenländern mit großen Bevölkerungszahlen wie beispielsweise Indien eignet, um das Marktpotential dort auszuschöpfen. Wichtig zu erwähnen ist auch, dass, unabhängig davon ob es sich bei dem betrachteten Produkt um eine frugale -, eine radikale - oder eine inkrementelle Innovation handelt, ein Referenzsystem vorliegt, auf dem die Entwicklungsaktivitäten beruhen. So gilt beispielsweise für das iPhone EDGE als radikale Innovation, dass alle späteren Funktionalitäten durch Referenzsystemelemente abgebildet werden konnten – also bereits im selben oder in einem anderen Kontext existierten.



Abbildung 7: Auszug des Referenzsystems des ersten iPhones

Es gab zum damaligen Zeitpunkt bereits Smartphones, wie beispielsweise das Nokia 9000. Auch existierten bereits Mobilfunktelefone mit integrierten Kameras. Lediglich zur Realisierung des intuitiven Bedienkonzept war eine Prinzipvariation notwendig. Dazu wurde auf ein Touchprinzip zurückgegriffen. Es existierten zum Entwicklungszeitpunkt jedoch ebenfalls bereits Apple-Produkte, die über ein Display verfügten, das auf Druck reagiert. Daraus wird ersichtlich, dass auch radikale Innovationen nicht auf dem vielbesungenen weißen Blatt Papier entstehen sondern auf Basis von Referenzen entwickelt werden.

#### 4.3 Unterschiede je Beispiel

Es lassen sich jedoch auch Unterschiede innerhalb der einzelnen Kategorien identifizieren. Bei der Betrachtung frugaler Innovationen wird deutlich, dass die Unterschiede vor allem aus der Nachfragesituation bzw. der adressierten Zielgruppe resultieren. Der Tata Nano weist innerhalb des Referenzsystems, aber auch bei der initialen Produktbeschreibung Elemente auf, die sich auf die niedrige Einkommensstruktur der Schwellenländer, welche als Zielmärkte adressiert sind, zurückführen lassen. So kann beispielsweise das 4-Gang Getriebe aufgeführt werden oder die Dominanz der Klebetechnik. Wird die Pro-

duktbeschreibung der radikalen Innovationen betrachtet, so lässt sich feststellen, dass diese gerade bei den Kernmerkmalen häufig einen hohen Anteil an Prinzipvariation im Verhältnis zu der Vorgängergeneration aufweisen. Beispielsweise integriert das iPhone EDGE einen Touchdisplay, um dem neuartigen Bedienkonzept gerecht zu werden. Der Rauchmelder Typ 105 verfügt über ein streulichtbasiertes Messprinzip und differenziert sich somit von den bis dato vorherrschenden Ionisationsmeldern, bei der Detektion von Bränden. Der Tesla Model S nutzt, um die Mobilität zu ermöglichen, elektrische Energie anstelle von fossilen Brennstoffen. Es wird deutlich, dass bei der Umsetzung der Kernfunktionen bei radikalen Innovationen auf eine neue, bereits in einer anderen Branche eingesetzte Technologie, zurückgegriffen wird. (Sood & Tellis 2005) Durch diesen Technologiesprung werden häufig weitere Use-Cases ermöglicht, die mit den bisher am Markt verfügbaren Lösungen nicht erfüllt werden können.

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Im vorliegenden Beitrag wurden drei in der Literatur definierte Produktinnovationsarten hinsichtlich der durch sie befriedigten Bedarfssituationen, sowie der ihnen zu Grunde liegenden Referenzsysteme analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass alle Innovationsarten gleiche Elemente beinhalten. Jede Innovation basiert auf einem Bedarf, der in einem Produktprofil modelliert werden kann. Zudem wird jede Innovation auf Basis bereits bestehender Referenzsystemelemente entwickelt. Bei der Betrachtung der Kombination aus Produktprofil und Referenzsystem lassen sich jedoch Unterschiede feststellen. Fordert demnach die Zielgruppe ein günstiges Produkt zur grundlegenden Befriedigung bestimmter Bedürfnisse, so bildet sich das Referenzsystem durch Elemente, die hinsichtlich ihrer Gestaltung sowie in ihrer Fertigung preisgünstig sind. Zudem resultiert die beschriebene Forderung der Zielgruppe in einer Produktgeneration mit sehr hohem Übernahmevariationsanteil. Referenzsysteme von Innovationen, die eine hohe Marktveränderung nach sich ziehen, beinhalten hingegen Elemente, die einen hohen Prinzipvariationsanteil im Kernmerkmal des jeweiligen Produkts nach sich ziehen.

Im vorliegenden Beitrag konnte zudem gezeigt werden, dass eine Modellierung des Produktprofils und des Referenzsystems vollkommen ausreicht, um Innovationen voneinander zu unterscheiden. Durch die im Sinne der PGE

quantifizierbaren Neuentwicklungsanteile lassen sich neue Produktgenerationen vollständig mathematisch erfassen. Dies ist mittels der Theorien des Innovationsmanagements oder der klassischen Konstruktionsmethodik nicht möglich.

Im Beitrag wurden lediglich Produktinnovationsarten untersucht. Aussagen über weitere, im Stand der Forschung beschriebene Innovationen, werden auf Basis dieser Erkenntnisse nicht getroffen. Zudem stellen die beschriebenen Beispiele eine erste Tendenz dar, werden derzeit jedoch noch nicht als repräsentativ angesehen.

## 6 Ausblick

Die aus der Analyse resultierenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden in zukünftigen Arbeiten dazu genutzt, relevante Implikationen für den Prozess der Mechatroniksystementwicklung abzuleiten. Hierdurch lassen sich in zukünftigen Forschungsarbeiten geeignete Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Methodeneinsatzes in Abhängigkeit des angestrebten Entwicklungsvorhabens ableiten, wodurch ein zielgerichtetes Vorgehen im Entwicklungsprozess unterstützt und entbehrliche Prozessanpassungen vermieden werden. Darüber hinaus können Entwicklungsrisiken durch einen ungeeigneten Methodeneinsatz minimiert werden.

## Literaturverzeichnis

- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Product Generation Development – Importance and Challenges from a Design Research Perspective. *New Developments in Mechanics and Mechanical Engineering*, 16-21.
- Albers, A., Heimicke, J., Hirschter, T., Reiß, N., Maier, A. & Bursac, N. (2018a). Managing Systems of Objectives in the agile Development of Mechatronic Systems by ASD – Agile Systems Design. *Proceedings of NordDesign 2018*.
- Albers, A., Heimicke, J., Spadinger, M., Reiss, N., Breitschuh, J., Richter, T., Bursac, N., Marthaler, F. (2019a). Eine Systematik zur situationsadäquaten Mechatroniksystementwicklung durch ASD – Agile Systems Design. In *KIT Scientific Working Papers* (Bd. 113). Karlsruhe: KIT.
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N., Ott, S., Bursac, N. (2018b). Product Profiles. Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. *Procedia CIRP*, 70 (1), 253-258.

- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F., Heimicke, J., Kurtz, V., Wessels. (2019b). The Reference System in PGE - Product Generation Engineering: A generalized Understanding of the Role of Reference Products and their Influence on the Development Process. Proceedings of 22nd International Conference on Engineering Design ICED 2019.
- Basedow, G. N., Heimicke, J., Albers, A., Wilmsen, M. & Marthaler, F. (2018). Improving R&D Success: Exploring modeling approaches for product profiles. 40th R&D Management Conference.
- Bennett, N. & Lemoine, G. J. (2014). What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world. *Business Horizons*, 57 (3), 311-317.
- Dahlin, K. B. & Behrens, D. M. (2005). When is an invention really radical? *Research Policy*, 34 (5), 717-737.
- Disselkamp, M. (2005). Innovationsmanagement. Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen (2. Aufl.): Springer Gabler.
- Gewald, J.-B., Leliveld, A. & Pesa, I. (2012). Transforming innovations in Africa. Explorative studies on appropriation in African societies (African Dynamics). Leiden: Brill.
- Ginzo, Y., Haruhiko, B., Yamamoto & H. (1986). PC-COMPATIBLE LAPTOP COMPUTER. Toshiba review International ed. (157), 26-28.
- Granig, P. & Perusch, S. (2012). Grundlagen des Innovationsmanagements. In P. Granig & S. Perusch (Hrsg.), Innovationsrisikomanagement im Krankenhaus. Identifikation, Bewertung und Strategien (1. Aufl., S. 21-86). s.l.: Gabler Verlag. Zugriff am 26.02.2019.
- Henderson, R. M. & Clark, K. B. (1990). Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly* (35), 9-30.
- Lenarduzzi, V. & Taibi, D. (2016, August - 2016, September). MVP Explained: A Systematic Mapping Study on the Definitions of Minimal Viable Product. In 2016 42th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA) (S. 112-119). IEEE.
- McDermott, C. (2002). Managing radical innovation: an overview of emergent strategy issues. *Journal of Product Innovation Management*, 19 (6), 424-438.
- Pahl, G., Beitz, W. & Feldhusen, J. (2007). Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung (7. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schumpeter, J. A. (1912). Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. (1. Aufl.). Leipzig: Verlag von Duncker & Humblot.
- Sood, A. & Tellis, G. J. (2005). Technological Evolution and Radical Innovation. *Journal of Marketing*, 69 (3), 152-168.
- Wirdemann, R. & Mainusch, J. (2017). Scrum mit User Stories (3., erweiterte Auflage). München: Hanser.
- Wynn, D. C. & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. *Research in Engineering Design*, 29 (2), 161-202.



Zeschky, M., Widenmayer, B. & Gassmann, O. (2011). Frugal Innovation in Emerging Markets. Research-Technology Management, 54 (4), 38-45.

## **Kontakt**

Jonas Heimicke, M. Sc.

[http://www.ipek.kit.edu/21\\_4935.php](http://www.ipek.kit.edu/21_4935.php)

Valentin Zimmermann, M. Sc.

[https://www.ipek.kit.edu/21\\_5568.php](https://www.ipek.kit.edu/21_5568.php)

Monika Klippert, B. Sc.

<https://www.ipek.kit.edu>

Dipl.-Ing. Markus Spadinger

[https://www.ipek.kit.edu/21\\_2655.php](https://www.ipek.kit.edu/21_2655.php)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)

IPEK – Institut für Produktentwicklung

76131 Karlsruhe

<http://www.ipek.kit.edu/index.php>



# **Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern – die überarbeitete VDI/VDE-Richtlinie 2424**

Robert Watty, Christian Zimmermann und Gerhard Reichert

## **1 Einleitung**

In den 1980er Jahren wurde erstmals eine VDI/VDE-Richtlinie "Industrial Design" erstellt, um die Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern im Produktentwicklungsprozess zu unterstützen. Viele darin beschriebene Grundlagen sind seitdem unverändert geblieben, aber Arbeitsweisen und Techniken haben sich basierend auf veränderten Entwicklungsprozessen, stärkerer Interdisziplinarität und der zunehmenden Digitalisierung umfassend weiterentwickelt.

Das Industriedesign als schöpferische, nutzungsorientierte und integrative Gestaltung von Funktion und Form eines industriell hergestellten Produkts ist heute mehr als je zuvor zu einem maßgeblichen Faktor für die Qualität von Produkten, deren Wahrnehmbarkeit am Markt und damit auch für die Identität der Unternehmen und der Marken geworden. Für Unternehmen wie z. B. Apple beruht der Markterfolg wesentlich auf dem Design der Produkte, die mit äußerem Erscheinungsbild und Bedienung Maßstäbe setzen. Die Erkennbarkeit von Produkten z. B. der Firma Miele und der damit verbundene Qualitätsanspruch beruhen wesentlich auch auf dem gezielten Design als wesentlichem Teil der Marke. Nicht nur Bedienbarkeit und Qualität der Benutzbarkeit, sondern auch Sichtbarkeit, Erkennbarkeit und Attraktivität sowie ökologische und ökonomische Aspekte von Produkten sind Gegenstand gezielter Gestaltung. Psychologische, physiologische und soziale Bedürfnisse verschiedener Beteiligter über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg können so schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung integriert

werden. So entsteht Nutzen nicht nur für die Anwender und Kunden, sondern auch für das Unternehmen, das von Differenzierung zum Wettbewerb, erkennbarer Identität und Kundenbindung auch wirtschaftlich profitiert.

Industriedesign ermöglicht Produkte als mit dem Menschen interagierende Objekte, wobei diese Interaktion durch gezielte Gestaltung bewusst und systematisch umgesetzt wird, Abbildung 1.

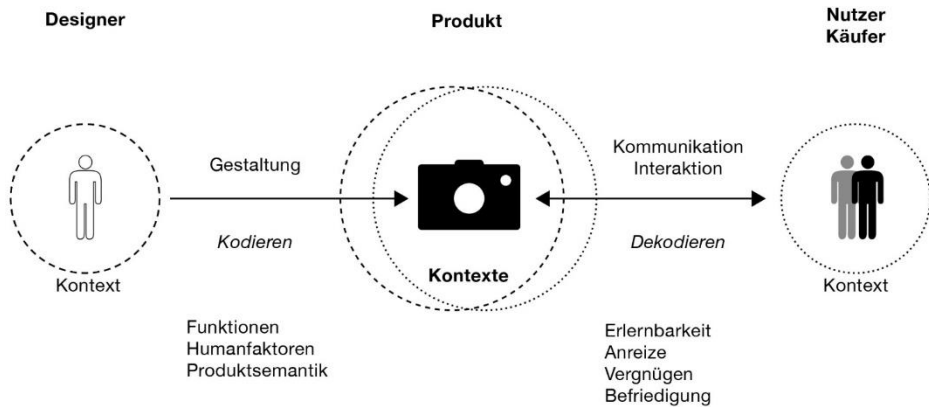


Abbildung 1: Produkt und Kommunikation

Gestalter kodieren Inhalte oder Assoziationen der Stakeholder mit dem Produkt so, dass diese von Nutzern adäquat dekodiert werden können. Dies setzt gleiche kulturelle Erfahrungen und Verständnis des Kontextes der Käufer und Nutzer voraus, damit die Anforderungen von Nutzer und Designer an das Produkt deckungsgleich sind. Über die eher technisch-funktionalen Aufgaben des Engineering hinaus werden so bei erfolgreicher Zusammenarbeit gezielte Nutzungserfahrungen ermöglicht, die innovative Lösungen und insgesamt bessere Produkte ergeben.

Daher wurde basierend auf der überarbeiteten und Ende 2018 im Entwurf erschienenen VDI-Richtlinie 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme“ die Kooperation von Ingenieuren und Designern in aktualisierter Form beschrieben, um eine verbesserte Einbindung des Industriedesign in den gesamten Produktentwicklungsprozess zu erreichen. Wesentlich dafür ist Schnittstellenkompetenz der Beteiligten und eine abgestimmte Vorgehensweise, die wiederum auf einer aus der Unternehmensstrategie abgeleiteten Marken- und Designstrategie beruht. Die Richtlinie beschreibt dazu die

Aktivitäten von Engineering und Design nicht nur in der eigentlichen Produktentstehung, sondern zusätzlich in Querschnitts- und Begleitprozessen wie der strategischen Planung, der Vorentwicklung und der Nutzungsphase des Produktes. Ergänzend werden Methoden und Werkzeuge des Industriedesign im Überblick dargestellt sowie praxisrelevante Checklisten, Hinweise und Beispiele hinzugefügt, um wechselseitiges Verständnis zu fördern und die Zusammenarbeit von Engineering und Industriedesign zu verbessern. Der erweiterte Bezugsrahmen der aktuellen VDI Richtlinie 2424 Industriedesign umfasst zudem die Ingenieurpsychologie / Human Factors Engineering sowie Marke und Markenführung über die markentypische Produktsprache.

Aufbauend auf dem Produktentwicklungsprozess werden die Bereiche Human Factors Engineering/Ingenieurpsychologie, sowie Marke und Markenführung folgend näher erläutert.

## 2 Produktentwicklungsprozess

Der gemeinsame Entwicklungsprozess orientiert sich an der in der VDI-Richtlinie 2221 [VDI 2018] beschriebenen Vorgehensweise, Abbildung 2.

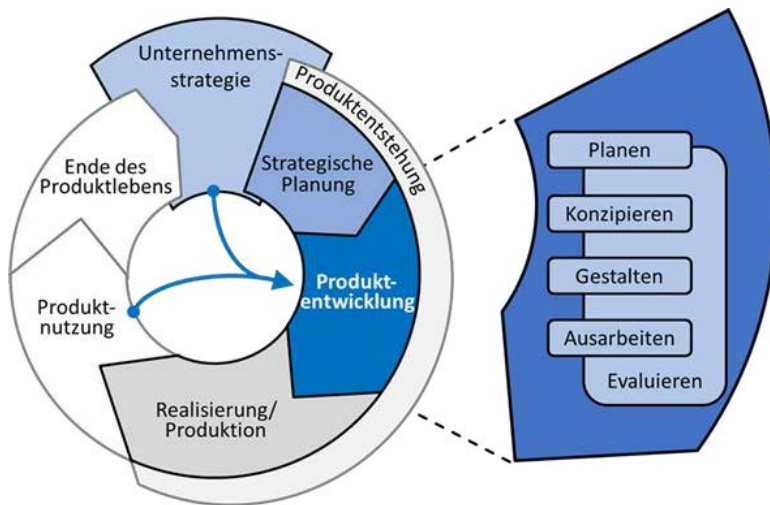


Abbildung 2: Technischer Produktlebenszyklus analog VDI 2221

Der eigentliche Produktentwicklungsprozess beginnt mit der Planung, bei der neben technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen auch Mensch-Produkt-Anforderungen berücksichtigt werden müssen. In der anschließenden Konzeptionsphase werden aufbauend auf den Anforderungen an das Produkt Lösungskonzepte und die Festlegung der Produktstruktur durch das Engineering und das Industriedesign gemeinsam erarbeitet und bewertet. Aus den ausgewählten Konzepten wird in der Entwurfsphase ein konkretes Produkt generiert. Es entsteht ein Produktentwurf unter Berücksichtigung von u. a. Funktion, Form, Abmessungen, Geometrie, Anmutungsqualität, Ergonomie, Interaktion, Material und Herstellungsmöglichkeiten. In der Ausarbeitungsphase ergänzt das Industriedesign die technische Detaillierung um die Gestalt (Farbe, Graphik, und Oberflächen) und setzt damit das Erscheinungsbild um und detailliert das Produktverhalten (Interaktion). Erst diese detaillierten Definitionen prägen die späteren Nutzungserfahrungen (User Experience) des Produkts.

Die Produktentwicklung im engeren Sinne wird von Querschnitts- und Begleitprozessen ergänzt. So wird z. B. die Marken- und Designstrategie über verschiedene Produktgruppen hinweg gestaltet, in der Vorentwicklung werden durch Engineering und Design erste Lösungsansätze abgeleitet und überprüft und eventuell vorhandene Vorprodukte im Markt werden während der Marktpresenz beobachtet, um Informationen für Neuentwicklung oder Weiterentwicklung aus technischer, wirtschaftlicher oder gestalterischer Sicht zu gewinnen, um Schlüsse für die folgende Überarbeitung oder Neuentwicklung zu ziehen.

Einen wesentlichen Beitrag zu besseren Produkten liefern während der Produktentwicklung die Erkenntnisse der Ingenieurpsychologie und der Marke/Markenführung, die nachfolgend näher erläutert werden.

### **3 Human Factors Engineering/Ingenieurpsychologie**

#### **3.1. Traditionslinien**

Obwohl in der Produktentwicklung zunehmend das «Human Factors Engineering» berücksichtigt findet bzw. als unabdingbare Schnittmenge von Gestaltungsabsichten und Ingenieurleistung etabliert wird, geht es auf eine lange Tradition zurück:

schon 1857 benennt Wojciech Jastrzębowski die Frühformen mit der gelehrten Neubildung «Ergonomie» (aus griech. ἔργον ergon = Arbeit, Werk + νόμος nomos = Regel, Gesetz). Die psychologische Forschung kümmerte sich bereits von ihren Anfängen in der zweiten Hälfte des 19ten Jahrhunderts um grundlegende Fragen, welche zur Gestaltung von Mensch-Umwelt-Schnittstellen in sozio-technischen Systemen relevant wurden. Das Fach «Ingenieurpsychologie» war Prüfungsfach für Psychologen der DDR, die auch eine entsprechende Forschergruppe an der Akademie der Wissenschaften unterhielt. Heute betont das Fach einen systemischen Blickwinkel und sieht sich als «Gestaltungswissenschaft».

### 3.2. Gegenstandsbestimmung von Human Factors Engineering/Ingenieurpsychologie

Human Factors Engineering/Ingenieurpsychologie legt den Fokus auf die ursächlichen Bedingungen, welche das Handeln von Menschen in komplexen technischen Umwelten (Mensch-Umwelt-Systemen), insbesondere Mensch-Maschine-Systemen (MMS) erleichtern und effizienter gestalten, dabei die Sicherheit maximieren und die Zufriedenheit der Handelnden erhöhen.

Human Factors Engineering etabliert sich als Mischdisziplin von Ingenieurwissenschaft, Psychologie und Industriedesign. Dabei sind inhaltliche und methodische Kenntnisse aus diesen Fachrichtungen zu integrieren und durch ein breites Verständnis die interdisziplinäre Zusammenarbeit sicherzustellen. Es geht darum, psychische und soziale Faktoren in sozio-technischen Systemen und Mensch-Maschine-Systemen zum Nutzen von Mensch und Umwelt im Entwurf und seiner technischen Realisierung zu etablieren.

### 3.3. Abgrenzung

Über die klassische Ergonomie und Arbeitswissenschaft hinaus liegt der Schwerpunkt nicht nur auf den physischen und anthropometrischen Eigenschaften, sondern kognitive, perzeptive und soziale Faktoren treten in den Fokus des Interesses. Dies entspricht dem historischen Wandel der Produktionsmittel: In einer sich immer stärker technifizierenden Welt werden die psychischen Begrenzungen des Menschen zur Grenze der sinnvollen Gebrauchsfähigkeit technischer und sozialer Artefakte.

### 3.4. Ziel

Im Zentrum steht die nutzergerechte Gestaltung, wobei eine Gesamtperspektive der Mensch-Umwelt-Relationen eingenommen wird.

So werden neben den zentralen Fragen von Funktionalität und des Gebrauchsnutzens, auch die Technikfolgenabschätzung und die soziale und ökologische Verantwortung über alle Produktlebensphasen berücksichtigt.

Technische Geräte sind in allen ihren Aspekten Gegenstand des Gestaltungsauftrages des Human Factors Engineering. Eine Teilmenge davon ist die Gestaltung und Auslegung der äusseren Anmutung und der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS, engl. HMI) und mit dieser ebenso die Gestaltung der Interaktion von Menschen mit digitalen Medien/Computern (HCI). Es gilt nach dem Masstab aller menschlicher Fähigkeiten und Grenzen (*conditio humana*) die sensorischen, perzeptiven, motorischen und kognitiven Anforderungen ebenso wie die sozialen Bedürfnisse des vergesellschafteten Menschen unbedingt zu respektieren. Durch die Orientierung auf menschliche Kapazitäten und Grenzen trägt eine Gestaltung im Sinne der Ingenieurpsychologie zur Funktions- und Betriebssicherheit aktiv und/oder passiv bei.

Unsere Lebenswelt ist gekennzeichnet durch zu hohe Reizdichten mit ihrer informationellen und perzeptiven Überlastung; menschengerechte Gestaltung heisst also optimale Einfachheit, Überblickbarkeit der Funktionen, Situationen und ihrer Handlungsoptionen sicherzustellen. Dabei wird das Ziel einer optimal einfachen Anmutung (weitestmögliche Eliminierung der Detraktoren), maximaler Selbsterklärungspotenz (Hinweisreize, Rückmeldungen etc.) und geeignete Aufmerksamkeitslenkung verfolgt.

Hierin deckt sich der Gestaltungsauftrag der Ingenieurpsychologie mit den Bestrebungen des klassischen Funktionalismus: Optimierung durch Reduktion mit dem Ziel der Verbesserung von Handhabbarkeit und Gebrauchstauglichkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Komfort sowie hinsichtlich der funktionalen Systemleistungen und der ökonomischen, sozialen und ökologischen Verträglichkeit. So wird der Produktentwurf des Industriedesigners und Ingenieurs zum Realisationsort ingenieurpsychologischer Expertise.



Dies betrifft auch die Zugänglichkeit der von den technischen und sozialen Artefakten intendierten Funktionen: steigende Funktionsanzahl eines Produktes bedeutet exponentiellen Zuwachs an Komplexität.

### 3.5. Gebrauchstauglichkeitsforschung

Empirische Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit (Usability Testing) folgt den etablierten und bewährten Ansprüchen und Paradigmen der experimentellen Psychologie und bedient sich auch deren Werkzeuge und Methoden (Erhebungsinstrumente wie Fragebögen, psychophysische Messungen relevanter Variablen wie z.B. Latenz- und Reaktionszeiten, Herzrate, Atemfrequenz, Hautleitfähigkeit, Pupillometrie, Eye- und Bewegungstracking, EEG bis hin zu fMRI etc.).

Die Ergebnisse werden nicht nur qualitativ betrachtet, sondern statistisch-numerisch ausgewertet (deskriptiv- und inferenzstatistisch) und geben objektivierbare Hinweise, welche Entwurfsvariante weiterverfolgt werden soll: Dadurch lassen sich zu einem sehr frühen Zeitpunkt ungeeignete Entwicklungsstränge vermeiden.

Ingenieurpsychologische Forschung wurde eine unverzichtbare Basis für Usability Engineering und Produktsicherheit.

### 3.6. Ergebnis

Schon in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses können gestaltungsrelevante Entscheidungen auf sinnvolle Alternativen eingegrenzt werden. Der Entwicklungsprozess wird damit sicherer, effizienter und planbarer, womit er den ökonomischen und organisatorischen Anforderungen an den Produktentwicklungsprozess entgegenkommt.

Von der streng nutzergerechten Gestaltung profitieren alle Nutzergruppen: möglichst viele Individuen sollen in einfachster Weise die Funktionen nutzen können; bei Alltagsprodukten profitieren davon auch Menschen mit Handicaps (was auch die erwünschte antidiskriminierende Wirkung impliziert) und die Gesellschaft als Ganzes im Angesicht des demographischen Wandels.

## 4 Marke und Markenführung über die markentypische Produktsprache

### 4.1 Unternehmensidentität

Unternehmen bündeln ihre grundlegenden Überzeugungen, Werte und den eigentlichen Zweck des Unternehmens als Vision. Jedes Unternehmen hat unterschiedliche Prioritäten, einige Unternehmen stellen ihre langjährige Unternehmensgeschichte, fundierte Produktgestaltung, Produktinnovation, Nachhaltigkeit usw. als Wesenskern in ihren Fokus. Die Unternehmensvision ist nur der erste Teil eines mehrstufigen Strategieentwicklungsprozesses wie Abbildung 3 zeigt. Aus der Vision, dem attraktiven Bild der vorstellbaren und möglichen Wirklichkeit, wird die Mission abgeleitet, sie beschreibt die Art und Weise wie die Vision erreicht wird. Ausgehend von der Mission werden Strategien, relevante Geschäftsmodelle und Businesspläne definiert und aus ihnen werden die Entwicklungsprojekte abgeleitet.

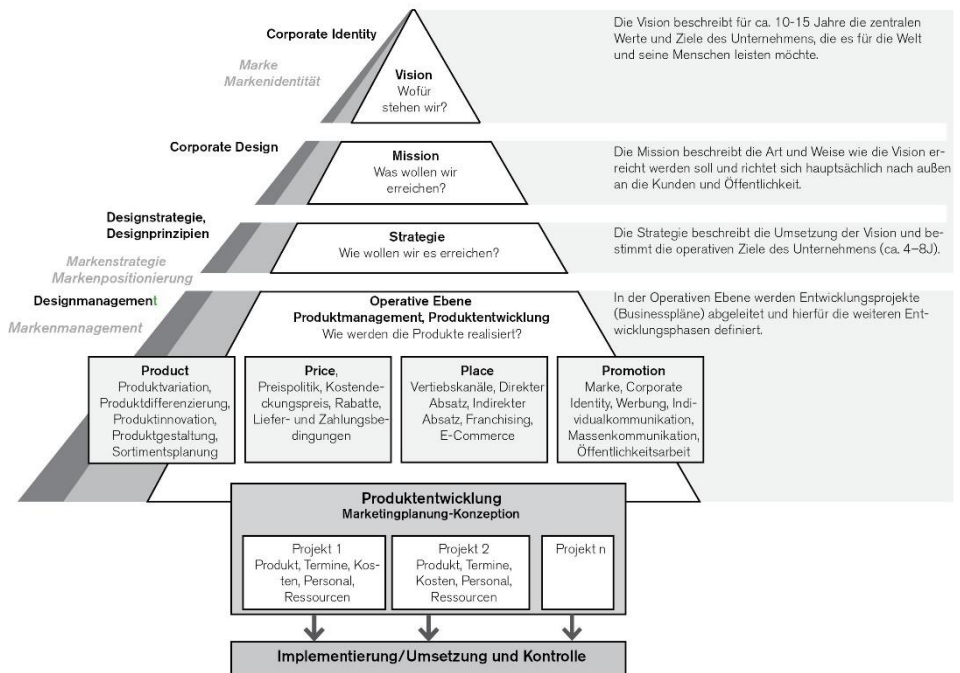


Abbildung 3: Übersicht Unternehmensidentität und Markenstrategie

## 4.2. Corporate Design (CD)

Das Corporate Design beinhaltet das Logo des Unternehmens, das Produkt-Design bzw. alle Elemente mit denen das Unternehmen in Erscheinung tritt.

Mit der Designstrategie werden Ziele und Leitlinien des Corporate Design im Sinne einer umfassenden, einheitlichen Produktgestaltung und Erscheinungsbildes festgelegt. Die notwendigen Gestaltungsrichtlinien werden in Corporate-Design-Manual dokumentiert, Das Manual ist in Struktur und Inhalt unternehmenstypisch.

Gängige Elemente eines Corporate-Design-Manuals sind:

- Erläuterungen zu Unternehmensvision
- Marke / Bildmarke
- Sprache/ Claims / Sprachstile
- Typografie/ Schriftarten
- Produktdesign/Marken-Produktsprache und Packaging
- Unternehmensfarben
- Drucksachen / Firmenunterlagen /PR
- Kataloge/ Raster/ Fotos
- Architektur/ Interieur Design / Fahrzeug / Beschriftungen/Berufskleidung
- Messeauftritt
- Multimedia/ Websites/ Seitentypen, Navigation, Buttons, Icons

Strategisches Designmanagement organisiert anhand der vorausgehend entwickelten Designstrategie den kreativen Entwicklungsprozess. In der Operativen Ebene des Corporate-Design-Programms werden (Design) Projekte und die entsprechenden Design-Teams koordiniert.

## 4.3 Marke

Mittels Marken (engl.: brand) sollen Produkte und deren Hersteller bzw. Unternehmen wiedererkannt werden. Die über Jahre entwickelte Markenbekanntheit einer Marke minimiert das Akzeptanzrisiko.

#### 4.4. Markenidentität

Die Markenidentität umfasst nach Prof. Dr. Daniel Markgraf diejenigen Merkmale der Marke, die aus Sicht der internen Zielgruppen in nachhaltiger Weise den Charakter der Marke prägen. Die Markenidentität entsteht in den Köpfen der Konsumenten und kann mit entsprechenden Kommunikationsmaßnahmen bis zu einem gewissen Grad gelenkt werden kann.

##### 4.4.1 Markenstrategie

Die Markenstrategie beschreibt die langfristigen Maßnahmen und Vorgaben für die Markenarchitektur sowie die Prozesse, wie sich die Marke in den kommenden Jahren entwickeln soll bzw. den Aufbau und die Steigerung des Markenwertes um den Geschäftserfolg des Unternehmens zu sichern.

##### 4.4.2 Markenpositionierung

Unter einer Markenpositionierung versteht man die bewusste Positionierung der Marke im relevanten Markt und der Vorstellungswelt des Kunden. Der Umfang bzw. Positionierung der Marke reicht nach Koppelman von der Monomarkte, Familienmarke bis zur Dachmarke. Die Markenpositionierung erfolgt u. a. durch Markenelemente, (engl. Brand Elements) wie z. B. Markennamen (Apple), Form (Cola-Flasche), Logos (Mercedes-Stern), Farben (Telekom Magenta), Markenklang (z.B. „Di-di-di-dii-di“ der Deutschen Telekom), Domains, Schrifttypen (Cola-Schriftzug) und Schlüsselbilder (Meister Propper).

##### 4.4.3 Markenmanagement

Markenmanagement (engl.: brand management) beschreibt alle Aktivitäten zum Aufbau und Weiterentwicklung einer Marke, mit dem Hauptziel, sein eigenes Angebot und Leistung aus der Masse vergleichbarer Angebote hervorzuheben, erkennbar von den Mitbewerbern zu differenzieren und für den Kunden eine eindeutige Zuordnung (Orientierung) und Vertrauen der eigenen Marke zu ermöglichen.

Beispiel Markenstrategie und Corporate Product Design am VW Golf:

Volkswagen bietet mit dem Golf ein Beispiel wie mit einem wegweisenden Design (Golf I, Design Giorgio Giugiaro) und der konsequenten Marken-Designstrategie ein langjähriger Erfolg erzielt wird. Wie Abbildung 4 zeigt, wurde die Golf I-typische, charakteristische Form (Corporate Produkt Design) mit

seiner hohen visuellen Markenwiedererkennung bei der Weiterentwicklung des Stylings (Linienführung, Proportionen, Strukturen, Formtrennungen usw.) der folgenden Golf-Modelle stufenweise verändert, um an den Erfolg des Golf I anzuknüpfen. Im Zuge dieses Erfolgs wurden parallel Gestaltungselemente des Golfs u. a. auf die Modelle Polo, Passat übertragen.

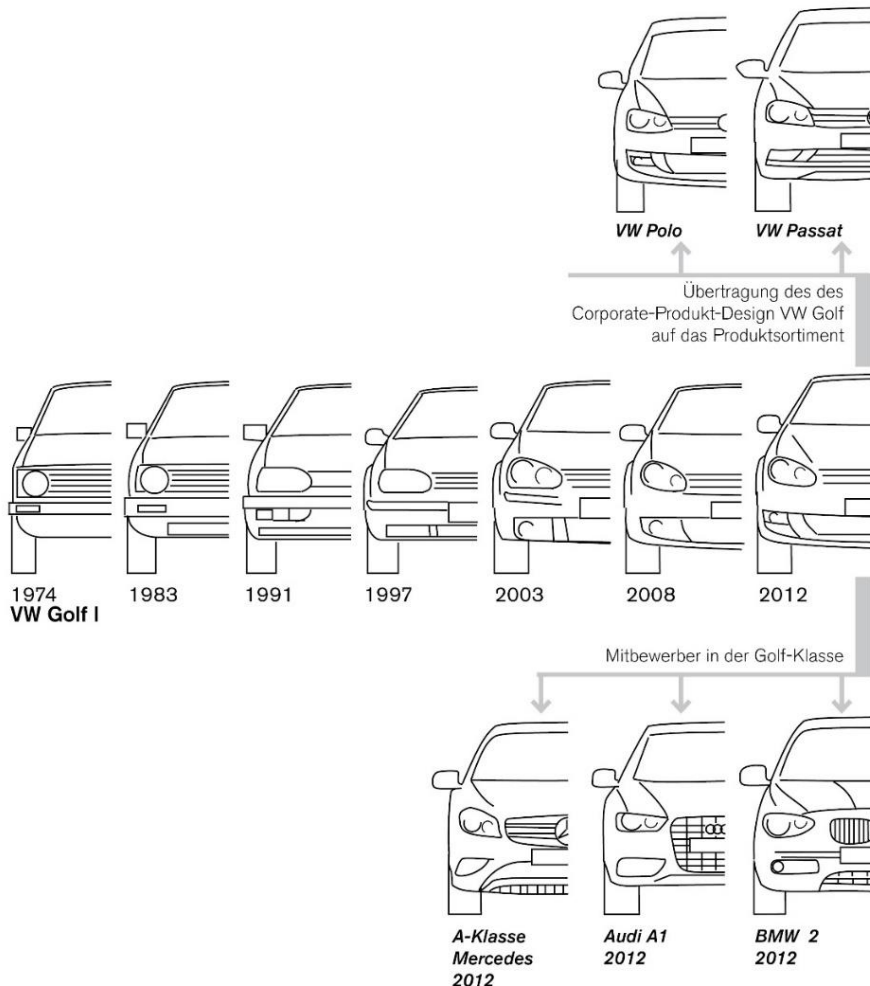


Abbildung 4: Entwicklung des Corporate Product Design bzw. der Markenproduktsprache, am Beispiel des VW Golf

## Literaturverzeichnis

- Domizlaff, H. 2005: Die Gewinnung des öffentlichen Vertrauens. Ein Lehrbuch der Markentechnik. München: Marketing Journal
- Koppelman, Udo. 2001: Produktmarketing. Berlin: Springer
- Sanders, M. S. & McCormick, E. J. (1993). Human Factors in Engineering and Design (7th ed.). New York: McGraw - Hill.
- Sarodnick, F. & Brau, H. (2006). Methoden der Usability Evaluation. Bern: Huber.
- VDI (Hrsg.) 2018: VDI 2221 Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung (Entwurf). Düsseldorf: VDI
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y. & Becker, S. E. G. (2004). An Introduction to Human Factors Engineering (2nd ed.). Upper Saddle River, New York: Pearson.
- Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R., (2013). Engineering psychology and human performance (4th ed). Pearson Academic.
- Zimolong, B. & Konradt, U. (2006). Ingenieurpsychologie. Göttingen: Hogrefe

## **Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Robert Watty  
Technische Hochschule Ulm  
Prittwitzstraße 10  
89075 Ulm  
[www.thu.de](http://www.thu.de)

Dr. Christian Zimmermann  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Leopoldstrasse 13  
D-80802 München  
Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd  
Rektor-Klaus-Straße 100  
D-73525 Schwäbisch Gmünd

Prof. Gerhard Reichert  
Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd  
Rektor-Klaus-Straße 100  
D-73525 Schwäbisch Gmünd  
[www.hfg-gmuend.de](http://www.hfg-gmuend.de)





# IM-UX – Fragebogen zu intrinsischer Motivation in der User Experience

Jette Selent und Michael Minge

## 1 Einleitung

*Intrinsische Motivation* gilt als wesentlicher Einflussfaktor dafür, dass Verhaltensweisen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit und über längere Zeiträume hinweg stabil gezeigt werden (Ryan & Deci 2000a, Vallerand 1997). Dies lässt sich auch bei der Nutzung von Software-Produkten beobachten, deren Nutzung nicht aus Notwendigkeit sondern freiwillig erfolgt. So gilt etwa die Playfulness (Verspieltheit) von Systemen nicht nur als Quelle für intrinsische Motivation, sondern auch als einer der wichtigsten Faktoren für das Entstehen und Aufrechterhalten von Akzeptanz und der Bereitschaft zur Nutzung eines Systems (Venkatesh 2000). Hwang und Yi (2002) sowie Lee, Cheung und Chen (2005) beschreiben, dass das Erleben von Lernerfahrungen bei der Nutzung eines Systems die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass es langfristig genutzt wird. Sowohl Spaß, als auch Wissens-, Fähigkeits- und Fertigkeitserwerb sowie spielerische Erfahrungen können demnach als Quellen intrinsischer Motivation betrachtet werden und es gibt Grund zu der Annahme, dass sich das Hervorrufen intrinsischer Motivation positiv auf die Wahrscheinlichkeit, Häufigkeit und Dauer der Nutzung eines Software-Produktes auswirkt.

Auch die *User Experience* (UX) bei der Nutzung interaktiver Produkte wird mit Faktoren intrinsischer Motivation in Verbindung gebracht. So beschreibt etwa Hassenzahl (2008) eine gute UX als Konsequenz der Befriedigung des Bedürfnisses unter anderem nach Autonomie, Kompetenz, und Verbundenheit. Diese Bedürfnisse gelten laut der *Selbstbestimmungstheorie* (Self-Determination Theory, SDT) von Deci und Ryan (1985) als Grundlage für das Entstehen intrinsischer Motivation. Kompetenz beschreiben Deci und Ryan

(2002b) hier als das Gefühl dafür, in welchem Ausmaß eine Person einen effektiven Einfluss auf ihre soziale und physische Umwelt ausüben kann. Darüber hinaus beinhaltet Kompetenz im Sinne der SDT das Erleben von Möglichkeiten, die eigenen Fähigkeiten und Fertigkeiten auszuüben und in kontrollierbarer Art und Weise weiterzuentwickeln (Deci & Ryan 2002a, White 1959). Nimmt eine Person sich selbst als Ursprung und Initiator ihrer Handlungen wahr, so wird dies als Erleben von Autonomie bezeichnet. Diese Empfindung wird dadurch begünstigt, dass die Person erlebt, die eigene Umwelt beherrschen und beeinflussen zu können (Angyal 1941). Autonomes Handeln bedeutet ebenso, dass das gezeigte Verhalten als Ausdruck des eigenen Willens verstanden, aus eigenem Interesse initiiert und im Sinne der eigenen Wertvorstellungen ausgeführt werden kann (Deci & Ryan 2002a). Als drittes Grundbedürfnis wird Geborgenheit, Einbettung in ein emotional stabiles soziales Umfeld sowie die Bindung an Bezugspersonen und eine Gesellschaft beschrieben (Ainsworth 1989, Baumeister & Leary 1995, Bowlby 1979). Das Gefühl von Verbundenheit im Sinne der SDT wird ebenfalls durch das Erleben einer Verbindung zu anderen Menschen, die auf gegenseitigem Für-einander-Sorge-Tragen beruht, gefördert (Ryan & Deci 2000b).

Für den langfristigen Erfolg von Technik und die Integration von Produkten in den Alltag von Nutzern ist die Frage entscheidend, ob es gelingt, diese intrinsischen Bedürfnisse zu befriedigen. Bestehende Fragebögen zur Erfassung intrinsischer Motivation, wie z.B. die Kurzskala intrinsische Motivation (KIM, Wilde et al. 2009) oder der Fragebogen zur aktuellen Motivation (FAM, Rheinberg et al. 2001) sind allerdings nicht für den Bereich UX validiert und bilden in ihrer Struktur nur selten etablierte theoretische Modelle ab. Daher wurde auf Grundlage der SDT ein neues Messinstrument konstruiert und anhand mobiler Applikationen validiert.

Als Antwortformat wurde das semantische Differenzial (Osgood, 1952) gewählt, da Friborg, Martinussen und Rosenvinge (2006) zeigen konnten, dass dies bei der Erfassung positiver psychologischer Konstrukte, zu denen auch intrinsische Motivation gezählt werden kann, Likert-Skalen vorzuziehen ist. Grund hierfür sei die geringere Verzerrung durch kontraintuitive Formulierungen, die bei Likert-Skalen durch die Negation positiver Konstrukte oder Begriffe entstehen können. Darüber hinaus haben sich semantische Diffe-

renziale bei der Messung von Einstellungen, Emotionen und bewertungsbezogenen Wahrnehmungen als adäquat erwiesen (Heise 1970). Außerdem sind sie bei der Bewertung von Software-Produkten und Designs, wie etwa bei Hassenzahl, Platz, Burmester und Lehner (2000), bei Hsu, Chuang und Chang (2000) bei Huang, Chen und Khoo (2012), bei Khalid und Helander (2004) sowie bei Lin (1992), weit verbreitet und akzeptiert.

Das Ziel war demnach, mit Hilfe semantischer Differenziale ein kompaktes Messinstrument für die Betrachtung der Befriedigung der drei Grundbedürfnisse nach der SDT bei der Nutzung interaktiver Softwareprodukte zu entwickeln.

## 2 Konstruktion des Fragebogens

Die intendierte Struktur des zu entwickelnden Messinstruments zielte darauf ab, die drei Grundbedürfnisse der SDT, *Kompetenz*, *Autonomie* und *Verbundenheit*, sowie zwei zusätzliche Komponenten zu erheben. *Stimulation* als Eigenschaft, Neugierde zu wecken und Spaß zu bereiten, wurde als wichtiger Einflussfaktor für intrinsische Motivation betrachtet (z.B. Vallerand 1997). Mit der *Akzeptanz* sollte außerdem ein Gesamturteil erfasst werden können. Nach Recherche bestehender Fragebögen zu intrinsischer Motivation und zum Nutzererleben sowie mehreren Brainstorming-Sessions wurden insgesamt 17 Items als Gegensatzpaare formuliert, die den fünf Dimensionen zugeordnet wurden (siehe Tabelle 1). Als Antwortformat wurde in Anlehnung an Hassenzahl, Burmester und Koller (2003) ein siebenfach gestuftes semantisches Differenzial gewählt (Osgood, 1952), da dies zur Erfassung positiver psychologischer Konstrukte likertskalierten Antwortformaten vorzuziehen ist und es darin unterstützt, spontane Urteile abzugeben (z.B. Fribourg et al. 2006).

### 2.1 Erste Datenerhebung

#### Methode

Die Überprüfung der dimensional Struktur erfolgte auf Basis einer Online-Datenerhebung, bei der  $n=119$  Probanden (78 weiblich, 41 männlich) eine ihnen bekannte mobile Applikation bewerteten. Die Auswertung der Daten

erfolgte mittels einer varianzmaximierenden Hauptkomponentenanalyse unter Anwendung des Minimum Average Partial (MAP-)Tests nach Velicer (1976).

### Ergebnisse

Die Eignung des Datensatzes zur Berechnung einer Hauptkomponentenanalyse ist durch ein Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)-Kriterium in Höhe von .788 sichergestellt. Im Ergebnis entsprach das Ladungsmuster der Items auf den extrahierten fünf Komponenten nicht zufriedenstellend der intendierten inhaltlichen Struktur des Fragebogens. Teilweise wiesen die Itempaare deutliche Schwächen auf. Insbesondere für die geplante Skala Kompetenz ist es nicht gelungen, eine in sich konsistente und gegenüber anderen Komponenten trennscharfe Skala zu konstruieren. Im Bereich der Akzeptanz fiel das Itempaar „kritisch-unkritisch“ deutlich heraus. In Folge wurde der Itempool überarbeitet und dort, wo bereits möglich, reduziert. Außerdem wurden neue Itempaare ergänzt. Durch diesen Schritt entstand eine neue Rohversion mit 14 Items.

<b>Kompetenz:</b> (behindernd - unterstützend) / (harmlos - herausfordernd) / (unterfordernd - überfordernd)
<b>Autonomie:</b> (bestimmt mich - berücksichtigt mich) / (starr - flexibel) / (einseitig - vielseitig) /
<b>Verbundenheit:</b> (entfernt mich von anderen - bringt mich anderen näher) / (ausgrenzend - einbeziehend) / (isolierend - verbindend)
<b>Stimulation:</b> (langweilig - unterhaltsam) / (herkömmlich - neuartig) / (belanglos - interessant) / (lästig - Spaßig)
<b>Akzeptanz:</b> (schlecht - gut) / (unangenehm - angenehm) / (kritisch - unkritisch) / (abstoßend - ansprechend)

*Tabelle 1: Liste der Itempaare in der Rohversion des Fragebogens für die erste Validierung.*

## 2.2 Zweite Datenerhebung

### Methode

Die Überprüfung der dimensional Struktur dieser zweiten Rohversion und die Itemselektion erfolgten auf Basis einer erneuten Datenerhebung, bei der  $n=79$  Probanden (46 weiblich, 31 männlich, 2 keine Angabe) analog zu 2.1 eine selbst gewählte mobile Applikation online bewerteten. Die Auswertung erfolgte durch Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation.

### Ergebnisse

Die Eignung des Datensatzes zur Berechnung einer Hauptkomponentenanalyse ist durch ein Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)-Kriterium von .733 sichergestellt. Die Ladungsverteilung der selektierten Items zeigt in diesem Fall ein hoch trennscharfes Muster mit inhaltlich intendierten Zusammenhängen auf den erwarteten extrahierten fünf Komponenten (siehe Tabelle 2).

Diese Komponenten erklären 79,567 % der Varianz (siehe Tabelle 3). Die interne Konsistenz der Skalen wurde mittels Reliabilitätsanalyse geprüft. Cronbach's Alpha-Werte sind, außer für Autonomie, zufriedenstellend bis gut. Jedoch kann auch ein Alpha von .5 für beginnende Forschung mit einem neuen Messinstrument als ausreichend betrachtet werden (Streiner, 2003).

Itempaar	I	II	III	IV	V
hinderlich - förderlich	.907				
bremst mich aus - bringt mich weiter	.828				
starr - flexibel		.827			
bestimmt mich - berücksichtigt mich		.681			
entfernt mich von anderen - bringt mich anderen näher			.860		
isolierend - verbindend			.816		
langweilig - unterhaltsam				.924	
lästig - Spaßig				.735	.507
schlecht - gut					.845
abstoßend - ansprechend					.768

Tabelle 2: Varimax-rotierte Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (dargestellt sind alle Faktorladungen  $>.4$ )

Komponente	Bezeichnung	Varianzaufklärung in Prozent	Cronbrachs Alpha
I	Kompetenz	17,081	.764
II	Autonomie	6,693	.506
III	Verbundenheit	14,270	.653
IV	Stimulation	8,670	.741
V	Akzeptanz	32,916	.767
Summe:		79,567	--

*Tabelle 3: Varianzaufklärung durch die Komponenten sowie Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse der Skalen.*

### 3 Diskussion

Es konnte ein hinsichtlich seiner faktoriellen Struktur und seiner internen Konsistenz überzeugender Kurzfragebogen zur Erfassung der wahrgenommenen Bedürfnisbefriedigung bei Interaktion mit technischen Systemen entwickelt werden, der zentrale Komponenten intrinsischer Motivation erfasst.

Einschränkend muss erwähnt werden, dass die zwei in den Studien akquirierten Stichprobenumfänge für den Zweck der Itemselektion mittels Hauptkomponentenanalyse mit  $n=119$  bzw.  $n=79$  Probanden als vergleichbar klein und als lediglich ausreichend akzeptabel eingestuft werden müssen. Die mit .788 bzw. .733 deutlich über den geforderten Mindestwerten von .5 (Cleff, 2015 & Field, 2013) bzw. .6 (Möhring & Schlütz 2013) liegenden Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterien lassen die Durchführung einer Hauptkomponentenanalyse und die Interpretation der Ergebnisse allerdings zweifelsfrei zu. Außerdem unterstützt die stabile Replikation der faktoriellen Struktur bei explorativem Vorgehen in zwei unabhängigen Stichproben die Annahme, dass die extrahierten Dimensionen von substanzieller Bedeutung und Trennschärfe sind.

Neben der in den vorgestellten Datenerhebungen fokussierten Sicherstellung der Reliabilität ist das Gütekriterium der Messgültigkeit (Validität) bislang noch nicht untersucht. Die Überprüfung der inhaltlichen Validität ist daher ein wichtiger weiterer Schritt. Neben der Überprüfung konvergenter und divergenter Validität, beispielsweise mittels Korrelation zu Fragebögen, die inhaltsnahe bzw. -ferne Konstrukte erfassen, ist außerdem wünschenswert, den Zusammenhang zu externen Außenkriterien zu ermitteln (z.B. Häufigkeit

freiwilliger Nutzung, Nutzungsintensität und –dauer oder Bevorzugung bestimmter Produkte oder Services gegenüber möglichen Alternativlösungen).

Mit lediglich 10 Items ist der vorgestellte Fragebogen IM-UX ein äußerst ökonomisches Messinstrument, dessen Beantwortung in aller Regel weniger als eine Minute benötigt. Es erlaubt eine standardisierte Messung und damit eine hohe Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Bewertungsobjekten (z.B. Produktalternative A und B), zwischen verschiedenen Nutzergruppen (z.B. Experten und Novizen) bzw. zu verschiedenen Messzeitpunkten (z.B. in frühen oder späteren Nutzungsphasen bei ein- und denselben Personen). Die Interpretation von Werten bei einmaliger Messung erfordert eine vorherige Definition von Ziel- bzw. Akzeptanzkriterien. Es liegen bislang keine Vergleichswerte vor, die einen branchen- oder produktspezifischen Benchmark vorgeben, oder einen standardisierten relativen Vergleich von Messwerten ermöglichen.

Die vorliegende Validierung des Messinstruments erfolgte unter Abfrage des Erlebens motivationaler Aspekte bei Interaktion mit mobilen Anwendungen. Aufgrund des Einsatzes generisch formulierter Adjektivpaare in der Form eines semantischen Differenzials erscheint der Einsatz auch für weitere Technologie- und Anwendungsbereiche (wie z.B. Websites, betriebliche Software, Fahrzeuge und Fahrzeuginterfaces, physische Produkte, Gebrauchsgegenstände, Haushaltsgeräte, etc.) prinzipiell möglich, wenn diese mittels erlebbarer Oberfläche für Anwender in Erscheinung treten. Interessiert das Erleben von Dienstleistungen oder Services sowie die UX spezieller Anwendungsbereiche, sollte im Einzelfall auf Basis der Augenscheinvalidität vorab geprüft werden, ob die Items für den Anwendungsbereich und die jeweilige Fragestellung der Erhebung sowohl inhaltlich passend als auch eindeutig formuliert sind.

Innerhalb der Phasen der menschenzentrierten Gestaltung (ISO 9241, Teil 210), kann der Fragebogen IM-UX bereits früh bei der Evaluation von Produktideen, Wireframes oder Klick-Prototypen eingesetzt werden, ebenso wie für bereits implementierte und marktgängige Produkte, mit dem Ziel, Optimierungsbedarfe für eine stärkere Kundenbindung und –begeisterung zu identifizieren. So lassen sich auf Basis bislang unterberücksichtigter Aspekte innovative Ideen für Erweiterungen und neue Funktionalitäten begründen und entwickeln, die das Potenzial, dass das Produkt durch Nutzer im Alltag als

stärker integriert erlebt wird, strategisch ausschöpfen. Im Rahmen der Evaluation bietet sich der Einsatz sowohl bei der Überprüfung von zuvor gesetzten Anforderungen in Laborstudien und User-Experience-Testings (Verifizierung) an, als auch bei der Validierung von Produkten, also der Überprüfung, ob sich Gestaltungslösungen im Alltag von Anwendern bewähren und für Sie einen wahrgenommenen Mehrwert generieren. Der Einsatz als Paper-Pencil-Version oder als Online-Fragebogen ist gleichfalls denkbar.

## 4 Ausblick

Neben der Erfassung von Emotionen ist die Erhebung motivationaler Aspekte eine wichtige Aktivität der Berücksichtigung einer guten User Experience in der Gestaltung und Evaluation von Technik. Der hier präsentierte Kurzfragebogen bietet eine Möglichkeit, diese Aspekte früh in der Entwicklung und kontinuierlich während der Implementierung zu erfassen. Die Überprüfung der Validität, z.B. mittels Korrelation zu inhaltlich ähnlich aufgebauten Fragebögen (Konstruktvalidität) sowie die Übereinstimmung mit Verhaltenskriterien (externe Validität) sind zentrale nächste Schritte. Ebenso wird momentan eine englischsprachige Version des Messinstruments erarbeitet und validiert. Der Fragebogen ist frei einsetzbar und kann von Interessierten für eigene Forschungs- und Anwendungszwecke verwendet werden.

## Literaturverzeichnis

- Ainsworth, M.S. (1989). Attachments beyond infancy. *American psychologist*, 44 (4), 709
- Angyal, A. (1941). *Foundations for a science of personality*
- Bowlby, J. (1979). *The making and breaking of affective bonds*. London, England: Tavistock Publications
- Cleff, T. (2015). *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA (3., überarbeitete und erweiterte Auflage)*. Wiesbaden: Gabler Verlag
- Deci, E.L. & Ryan, R.M. (2002a). *Handbook of self-determination research*. University Rochester Press
- Deci, E.L., Ryan, R.M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination*. New York: Plenum
- Deci, E.L. & Ryan, R. M. (2002b). Overview of self-determination theory: An organismic dialectical perspective. *Handbook of self-determination research*, 3–33
- Field, A.P. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: And sex and drugs and rock 'n' roll (4th edition)*. Los Angeles: Sage



- Fribourg, O., Martinussen, M., Rosenvinge, J.H. (2006). Likert-based vs. Semantic differential-based scorings of positive psychological constructs: A psychometric comparison of two versions of a scale measuring resilience. *Personality and Individual Differences*, 40 (5), 873-884
- Hassenzahl, M. (2008). User experience (UX): towards an experiential perspective on product quality. In *IHM*, 8, 11-15
- Hassenzahl, M., Burmester, M. & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In J. Ziegler & G. Szwillus (Hrsg.), *Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung* (S. 187–196). Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner
- Hassenzahl, M., Platz, A., Burmester, M., Lehner, K. (2000). Hedonic and ergonomic quality aspects determine a software's appeal. In *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems*, 201–208
- Heise, D.R. (1970). The semantic differential and attitude research. *Attitude measurement*, 235–253
- Hsu, S.H., Chuang, M.C., Chang, C.C. (2000). A semantic differential study of designers' and users' product form perception. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25 (4), 375–391
- Huang, Y., Chen, C.-H., Khoo, L. P. (2012). Products classification in emotional design using a basic-emotion based semantic differential method. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42 (6), 569–580
- Hwang, Y. & Yi, M. (2002). Predicting the use of web-based information systems: intrinsic motivation and self-efficacy. In *Proceedings of the 2002 - eighth americas conference on information systems*, 1076–1081
- Khalid, H.M. & Helander, M.G. (2004). A framework for affective customer needs in product design. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5 (1), 27–42
- Lee, M. K., Cheung, C. M. & Chen, Z. (2005). Acceptance of internet-based learning medium: the role of extrinsic and intrinsic motivation. *Information & Management*, 42 (8), 1095–1104
- Möhring, W., Schlütz, D. (2013). *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft*. Wiesbaden: Springer VS
- Osgood, C.E. (1952). The nature and measurement of meaning. *Psychological Bulletin*, 49 (3), 197-237
- Rheinberg, F. Vollmeyer, R., Burns, B.D. (2001). FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen. *Diagnostica*, 47, 57-66
- Ryan, R.M., Deci, E.L. (2000a). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary educational psychology*, 25 (1), 54–67
- Ryan, R.M., Deci, E.L. (2000b). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American psychologist*, 55 (1), 68
- Streiner, D.L. (2003). Starting at the beginning: an introduction to coefficient alpha and internal consistency. *Journal of Personal Assessment*, 80 (1), 99-103

- Velicer, W. (1976). Determining the Number of Components from the Matrix of Partial Correlations. *Psychometrika* 41 (3), 321-327
- Vallerand, R.J. (1997). Toward a hierarchical model of intrinsic and extrinsic motivation. *Advances in Experimental Social Psychology*, 29, 271–360
- Venkatesh, V. (2000). Determinants of perceived ease of use: Integrating control, intrinsic motivation, and emotion into the technology acceptance model. *Information Systems Research*, 11 (4), 342–365
- White, R.W. (1959). Motivation reconsidered: The concept of competence. *Psychological Review*, 66 (5), 297
- Wilde, M, Bätz, K., Kovaleva, A., Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzsкала intrinsische Motivation (KIM). *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15, 31-45

## **Kontakt**

Jette Selent, M.Sc. Human Factors  
468 Sierra Vista Ave Apt 9  
94043 Mountain View, CA, USA

Dr.-Ing. Dipl.-Psych. Michael Minge  
Technische Universität Berlin  
Marchstraße 23, Sekr. MAR 3-2  
10585 Berlin  
[www.tu-berlin.de/kke](http://www.tu-berlin.de/kke)

# Konzept zur Identifikation relevanter Produkteigenschaften zur Unterstützung einer positiven User Experience

Tina Schröppel, Jörg Miehl und Sandro Wartack

## 1 Motivation und Kontext

Technische Raffinesse, ein hohes Maß an Funktionalität und eine sehr gute Gebrauchstauglichkeit werden vom Nutzer zunehmend als gegeben vorausgesetzt. Stattdessen rückt das positive Erleben von Technologie, also eine positive User Experience (UX) stärker in den Fokus. Dabei geht es nicht mehr um das Produkt im eigentlichen Sinne, sondern um die Erlebnisse und Gefühle, die der Nutzer bei der Produktnutzung erfährt (Hassenzahl & Tractinsky 2006). Besondere Bedeutung hat dabei die Interaktion zwischen Nutzer und Produkt und wie diese durch den Menschen wahrgenommen und verarbeitet wird (Saucken 2017). Mit dem Ziel eine angenehme Nutzer-Produkt-Interaktion (NPI) zu schaffen, treten vor allem die verschiedenen Produkteigenschaften und -merkmale in den Fokus. Je nachdem, wie diese ausgeprägt sind, kann das Erlebnis negativ gestört oder positiv beeinflusst werden (Beispiel siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Darstellung einer positiven (links) und negativen (rechts) Nutzer-Produkt-Interaktion am Beispiel eines Kopfhörers

Kopfhörer können sich aufgrund der gewählten Form sowie des verwendeten Materials bspw. weich und bequem anfühlen. Eine weniger ergonomische Gestalt oder der Einsatz rauer Materialien wirken sich hingegen negativ aus, sprich das Tragen der Kopfhörer fühlt sich unangenehm und kratzend an. Entscheidend für ein gutes Nutzungserlebnis wäre in diesem Beispiel insbesondere die Eigenschaft Tragekomfort.

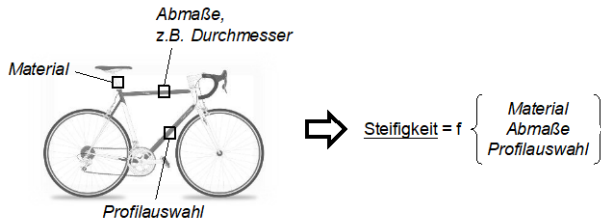
Aufgrund der Fülle an Produkteigenschaften ist es nicht immer einfach, diese auf die für die NPI Wesentlichen zu reduzieren. Der vorliegende Beitrag nimmt sich dieser Problematik an und stellt ein Konzept zur Identifikation der für die NPI relevanten Eigenschaften vor. So wird der Produktentwickler für mögliche Störquellen der NPI sensibilisiert und kann diesen entgegenwirken – was letztlich die Grundlage für eine positive UX schafft.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Produktbeschreibung im Entwicklungsprozess

Um die im Produktentwicklungsprozess entstehenden Informationen beherrschbar und zugänglich zu machen, können diese in Form von Produktmodellen zusammengefasst werden (Ehrlenspiel & Meerkamm 2017). Sie dienen u.a. der „Erfassung und Analyse wesentlicher Eigenschaften eines Produkts, die für eine Bewertung hinsichtlich der Produktqualität und Anforderungserfüllung relevant sind“ (Ponn & Lindemann 2011). Eine exakte Darstellungsform der Eigenschaften ist dabei nicht vorgegeben. In der Literatur finden sich hierzu verschiedene Ansätze.

Eine semantische Beschreibung von Produkten kann bspw. über Ontologien erreicht werden. Sie werden über eine Beschreibungslogik formalisiert (Baader et al. 2017) und kommen u.a. als Grundlage für intentionales Vergessen in der Produktentwicklung zum Einsatz (Kügler et al. 2018). Im Rahmen der matrixbasierten Produktbeschreibung lassen sich hingegen tabellarisch Zusammenhänge zwischen Produktmerkmalen und -eigenschaften dokumentieren und beschreiben (Luft & Wartzack 2013). Insbesondere im Bereich des Variantenmanagements und der Einflussanalysen bietet diese Art der Produktbeschreibung aufgrund identifizierter Relationen Vorteile. Beim CPM/PDD-Ansatz nach Weber (2005) wird explizit zwischen Merkmalen und Eigenschaften unterschieden (siehe Abbildung 2).



Legende: Merkmale / Eigenschaften

Abbildung 2: Merkmale und Eigenschaften am Beispiel Fahrrad

Produkteigenschaften lassen sich dabei nur indirekt über die vom Entwickler direkt gestaltbaren Merkmale beeinflussen (Weber 2005). Die Eigenschaft Steifigkeit würde sich bspw. aus Merkmalen wie Material, Abmaßen oder der Profilauswahl ergeben. Diesem Ansatz folgend, können Eigenschaften auf unterschiedliche Produkte bezogen werden, wohingegen Merkmale produktspezifisch sind. Da das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept zur Eigenschaftsidentifikation ebenfalls zunächst allgemein Produkteigenschaften identifiziert und anschließend produktspezifische Merkmale durch den Entwickler gestaltet werden, basiert das Begriffsverständnis von Merkmalen und Eigenschaften in diesem Beitrag auf den Definitionen von Weber (2005).

## 2.2 UX und Nutzer-Produkt-Interaktion

Technologien bzw. Produkte werden nicht einfach nur verwendet, sie werden erlebt – emotional, intellektuell und mit allen Sinnen (McCarthy & Wright 2004). Im gängigen Sprachgebrauch wird das als UX, also als Nutzungserlebnis verstanden. Eine einheitliche Definition hierfür gibt es nicht (Hassenzahl 2008). Stattdessen reicht das Verständnis von UX von einer einzelnen Interaktion eines Nutzers mit einem Produkt bis hin zu mehreren Nutzern, die in verschiedenen Bereichen (z. B. Service) mit dem Unternehmen interagieren (Law et al. 2009). Aus Sicht der Produktentwicklung kann die UX insbesondere durch die bestmögliche Ausgestaltung der unmittelbaren Interaktion zwischen Nutzer und Produkt positiv beeinflusst werden. Die NPI ist dabei ein rückgekoppeltes System zwischen Nutzer und Produkt (siehe Abbildung 3). Der Nutzer nimmt das Produkt physiologisch sowie psychologisch wahr (Glende 2010), woraus ein bestimmtes Verhalten gegenüber dem Produkt,

aber auch gegenüber dem Nutzer resultiert (Seeger 2005). Während der Nutzer in diesem Kontext physiologische sowie psychologische Charakteristika aufweist (Freudenthal 1999), besteht das Produkt aus einer Sammlung von Merkmalen und Eigenschaften (Weber 2005).

Um die UX im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, gibt es unterschiedliche Ansätze und Methoden. Desmet (2002) fokussiert sich bspw. auf das Hervorrufen positiver Emotionen durch die Produktgestalt. Solch ein *Positive Design* soll letztlich das subjektive Wohlbefinden des Nutzers fördern (Desmet und Pohlmeier 2013). In eine ähnliche Richtung geht auch Norman (2005) mit seinem Ansatz zum *Emotional Design*. Das von Hartson & Pyla (2012) entwickelte Phasenmodell greift klassische Gestaltungsprozesse auf und beginnt mit einer Analyse der Nutzerbedürfnisse (bspw. durch Interviews) auf Basis derer verschiedene Designkonzepte entwickelt werden. Anschließend werden sie als Prototypen umgesetzt und mittels unterschiedlicher Evaluationsmethoden überprüft und verbessert. Dies kann beispielsweise mittels dem *AttrakDiff*-Fragebogen (Hassenzahl et al. 2003) oder dem Instrument *ACADE* (Zöller & Wartack 2017) erfolgen. Auch die *ISO 9241* gibt einen Prozess zur Berücksichtigung der UX vor und beschreibt in diesem Zusammenhang allgemein die Grundsätze menschenzentrierter Gestaltung (DIN EN ISO 9241-210).

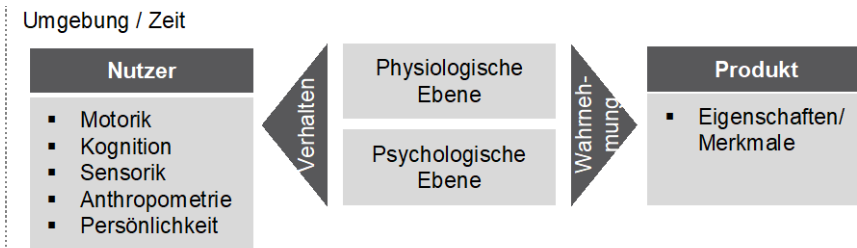


Abbildung 3: Modell der Nutzer-Produkt-Interaktion (Freudenthal 1999; Seeger 2005; Glende 2010)

### 3 Handlungsbedarf und Forschungsfrage

Die NPI ist integraler Bestandteil der UX, wobei der Entwickler die Interaktion durch die Gestaltung der Produkteigenschaften und -merkmale positiv oder negativ beeinflussen kann. Bestehende Methoden zur Berücksichtigung der UX fokussieren sich derzeit häufig auf weiche, subjektive Faktoren und deren

(allgemeinen) Einfluss auf die Produktgestalt. Eine konkrete Ableitung relevanter Produkteigenschaften zur Ausgestaltung der NPI findet selten Beachtung. Stattdessen ist der Entwickler mit einer ganzen Reihe unterschiedlicher Eigenschaften konfrontiert, die teils nur geringe Bedeutung für die NPI und das damit einhergehende Nutzungserlebnis haben. Die sich ableitende Forschungsfrage lautet deshalb: *Wie können die im Kontext der NPI relevanten Eigenschaften identifiziert und dem Produktentwickler gewinnbringend zugänglich gemacht werden?*

Um dieser Frage zu begegnen, wird in diesem Beitrag ein erstes Konzept zur Identifikation der für die NPI relevanten Eigenschaften vorgestellt. Hierdurch sollen Produktentwickler primär für die Thematik sensibilisiert werden, um so eine Steigerung der UX durch die passende Gestaltung der Interaktionschnittstelle zu fördern.

#### **4 Konzept zur Identifikation relevanter Produkteigenschaften**

Das Konzept zur Identifikation der für die NPI relevanten Produkteigenschaften besteht aus drei wesentlichen Schritten (siehe Abbildung 4) und kommt dann zum Einsatz, wenn eine Interaktion vorliegt. Dementsprechend eignet es sich insbesondere für Konsumgüter oder allgemein Produkte mit Bedienelementen (z. B. Maschinen).

Besteht eine NPI, werden zunächst vordefinierte Standardinteraktionen (z. B. Greifen) ausgewählt und betroffenen Bereichen des Produkts zugeordnet. Hierfür analysiert und dokumentiert der Produktentwickler jene Stellen des Produkts, an denen eine Interaktion stattfindet. Z. B. Drücken von Knöpfen an einem Bedienelement. Hierbei werden komplexe Vorgänge als Abfolge einzelner Standardinteraktionen beschrieben und damit auf wenige wesentlichen Interaktionen heruntergebrochen. Die Standardinteraktionen untergliedern sich dabei maßgeblich in physische und nicht-physische Interaktionen auf Basis der fünf menschlichen Sinne. Sie leiten sich aus der Literatur sowie durchgeführter Interaktionsanalysen ab (siehe Kapitel 4.1).

Nach der Zuordnung der Standardinteraktionen zu den relevanten Produktbereichen, kann die Ableitung relevanter Eigenschaften geschehen (siehe Kapitel 4.2). Dies erfolgt mithilfe einer Wissensbasis, in der den einzelnen Standardinteraktionen allgemeingültige und produktunabhängige Eigenschaften

zugeordnet sind. Die Abfrage findet mittels einer einfachen WENN/DANN-Logik statt, in der die zur jeweiligen Standardinteraktion gehörenden Eigenschaften abgeleitet werden. Die für die Wissensbasis nötigen Informationen kommen u.a. aus der Literatur, Normen, Richtlinien, Konstruktionskatalogen sowie allgemein aus Ansätzen der Ergonomie und Gestaltlehre. Nach Ermittlung der relevanten Eigenschaften für die einzelnen Produktbereiche folgt im letzten Schritt eine Zuordnung und passende Ausgestaltung spezifischer Produktmerkmale. Beide Tätigkeiten sind derzeit noch vom Produktentwickler manuell vorzunehmen. Um diesen besser zu unterstützen und die Effizienz zu steigern wird derzeit an einer programmtechnischen Umsetzung des Konzepts gearbeitet.

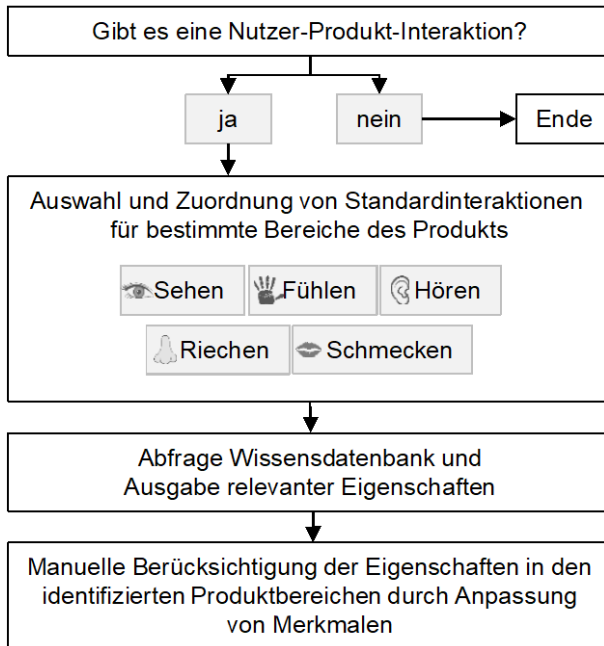


Abbildung 4: Konzept zur Identifikation relevanter Produkteigenschaften im Kontext der NPI



#### 4.1 Ableitung von Standardinteraktionen

Grundsätzlich gibt es physische und nicht-physische Standardinteraktionen. Sie basieren auf den fünf menschlichen Sinnen und besitzen damit einen visuellen, taktilen, geschmacklichen, hörenden und/oder riechenden Charakter. Dabei wird das Sehen, Hören, Schmecken und Riechen unverändert als Interaktion aufgenommen. Taktile Vorgänge sind im Kontext der Produktnutzung hingegen weiter zu unterteilen. So sind bspw. das Greifen und Drücken taktile Vorgänge, die sich in den zu berücksichtigenden Eigenschaften stark unterscheiden. Liegt beim Greifen der Fokus auf einer guten Griffbarkeit, sind beim Drücken das Gewicht oder auftretende Widerstände entscheidend.

In der Literatur finden sich aus verschiedenen Disziplinen Bestrebungen, Standardelemente menschlicher Bewegung bzw. Interaktion zu beschreiben. Beispielsweise Gilbreths und Gilbreths (1913, 1917) Ableitung von 16 Grundbewegungselementen des Menschen bei Arbeitsabläufen (z. B. Fügen, Demontieren) oder dessen Weiterentwicklung durch Quick et al. (1962) mit dem Work-Factor-Modell, welches die Anzahl an Standardbewegungen auf 11 Elemente reduziert. Im Kontext der Produktentwicklung findet sich insbesondere das Konzept der Affordanzen. Der vom amerikanischen Psychologen James J. Gibson 1979 eingeführte Begriff beschreibt den Angebotscharakter eines Objekts – sprich die Interaktionsmöglichkeiten, die sich aus der Eigenschaft des Objekts und den Fähigkeiten des Lebewesens (Mensch oder Tier) ableiten (Gibson 1979). Aufgrund der Erfahrung, die ein Mensch über seine Lebenszeit gesammelt hat, weiß dieser bspw., dass sich zylindrisch verlaufende Türgriffe greifen und drücken lassen (siehe Abbildung 5).

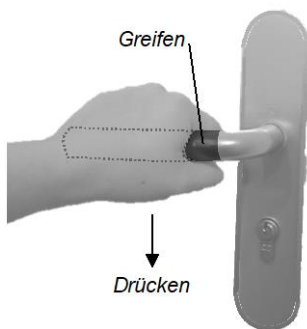


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Affordanzen eines Türgriffs

Das Konzept wurde später von Norman (2002) auf die Produktgestalt übertragen, wobei Affordanzen hierbei als mögliche und vom Designer vorgesehene Interaktionen zwischen Nutzer und Produkt verstanden werden, die sich aus der Produktgestalt ergeben. Während Gibson allgemein das *Angebot* (z. B. „Greifbarkeit“) beschreibt, fokussiert sich Norman auf die tatsächliche Interaktion (z. B. „etwas greifen können“). Wie viele Affordanzen es tatsächlich gibt ist bisher nicht untersucht. Tabelle 1 gibt eine kompakte Übersicht möglicher Interaktions-/ Bewegungselementen der drei vorgestellten Ansätze.

Affordanzen nach Kim et al. (2009)	Grundbewegungselemente nach Gilbreth und Gilbreth (1917)	Grundbewegungselemente nach Quick et al. (1962)
etwas greifen können etwas händisch bedienen können etwas ausrichten können etwas einsetzen können etwas fallen lassen können etwas niederdrücken können etwas absenken können etwas berühren können etwas herausziehen können uvm.	Bewegen (mit/ohne Last) Suchen Finden Auswählen Greifen In-Lage-Bringen Vorrichten Ausführen Demontieren Loslassen Überlegen Prüfen Ausruhen (un)vermeidbare Verzögerung Festhalten	Bewegen Hinlangen Transportieren Greifen Vorrichten Fügen Ausführen Demontieren Loslassen Halten Warten

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Interaktions-/Bewegungselemente

Die Analyse der drei untersuchten Ansätze und Konzepte zeigt, dass sich bestimmte Interaktionen wie bspw. das Greifen wiederholen. Dies ist ein erstes Indiz für das Vorhandensein von Standardinteraktionen. Problematisch ist jedoch die große Anzahl identifizierbarer Affordanzen sowie der fehlende NPI-Bezug der Grundbewegungselemente. Aus diesem Grund wird für die Ableitung von Standardinteraktionen ergänzend eine Studie zur Untersuchung der NPI durchgeführt. Hierbei werden 10 unterschiedliche Produkte beispielhaft angewendet und die auftretenden Interaktionen analysiert. Die betrachteten Produkte sind ortsgebunden oder -ungebunden und unterscheiden sich in Anzahl und Charakter der Interaktionen (siehe Abbildung 6).

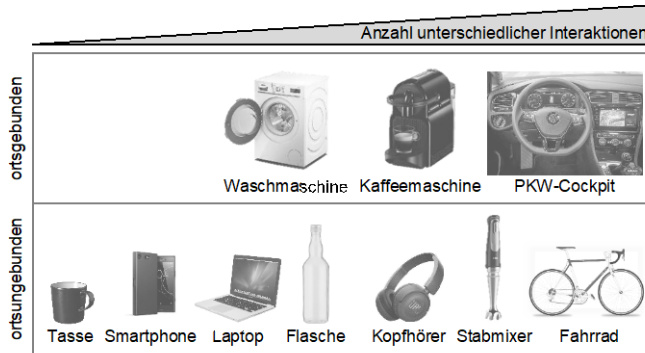


Abbildung 6: Übersicht analysierter Produkte

Im Rahmen der Studie werden die vorgestellten Produkte nun beispielhaft angewendet und die dabei vorkommenden Interaktionen sowie zugehörigen Beispiele dokumentiert und untersucht. Für die Kaffeemaschine lassen sich z. B. insgesamt sechs unterschiedliche Interaktionen identifizieren (siehe Abbildung 7): *Drücken* (z. B. Finger-Druckknopf), *Greifen* (z. B. Finger-Bügelverschluss), *Transportieren* (in Kombination mit Greifen Hand-Wasserbehälter), *Hochheben* (z. B. Finger-Verschlusskappe), *Riechen* (z. B. Nase-Kaffeeduft), *Fühlen* (z. B. Hand-Gehäuse).



Abbildung 7: Untersuchung auftretender NPIs am Beispiel der Kaffeemaschine

Initial konnten 18 unterschiedliche NPI-Typen identifiziert werden, von denen sich 12 regelmäßig wiederholen – aufgrund der Häufigkeit seien insbesondere das Greifen, Drücken und Ziehen hervorgehoben. Zudem zeigen sich einige prinzipielle Übereinstimmungen mit den Grundbewegungen nach

Quick et al. (1962) wie bspw. Bewegen, Transportieren oder Greifen. Dem arbeitswissenschaftlichen Ansatz fehlt es dennoch an einigen wesentlichen NPIs wie z. B. das Drücken oder Ziehen. Dementsprechend ist eine Erweiterung sowie Vereinheitlichung der Begriffe nötig. Die im Rahmen der Untersuchung identifizierten Interaktionen werden deswegen einzeln untersucht, mögliche Aufteilungen in übergeordnete Interaktionen geprüft und durch einen Abgleich mit den Grundbewegungen komplementiert. Somit können letztlich die 20 in Abbildung 8 dargestellten Standardinteraktionen abgeleitet werden.



Abbildung 8: Identifizierte Standardinteraktionen

Mithilfe der Standardinteraktionen können Produkte nun schnell und einfach hinsichtlich der auftretenden NPIs analysiert werden. Hierfür beschreibt der Produktentwickler, an welchen Stellen des Produkts welche der identifizierten Interaktionen auftreten. Dies bildet die Ausgangssituation für die Ableitung relevanter Eigenschaften.

## 4.2 Eigenschaftszuordnung

Dem Produktentwickler ist nun bekannt, an welchen Stellen des Produkts welche Standardinteraktionen vorkommen. Zur Ableitung relevanter Eigenschaften folgt eine Abfrage der Interaktionen in der aufgebauten Wissensdatenbank (siehe Abbildung 9). Sie liegt derzeit als Exceldatei vor und verknüpft bestehendes Wissen aus der Literatur, Normen, Konstruktionskatalogen oder allgemein Gestaltungsgrundsätzen. Dabei wurde für jede Standardinteraktion eine oder mehrere Eigenschaften identifiziert und mit Quellenverweisen in die Datenbank eingepflegt. Bei einer Abfrage gibt der Produktentwickler lediglich ein, welche Standardinteraktionen bei seinem Produkt auftreten werden/sollen und erhält dann eine nach Interaktionen sortierte Liste relevanter

Eigenschaften. Aufgrund der vorab identifizierten Produktbereiche lässt sich wiederum der Geltungsbereich der Eigenschaften detektieren.

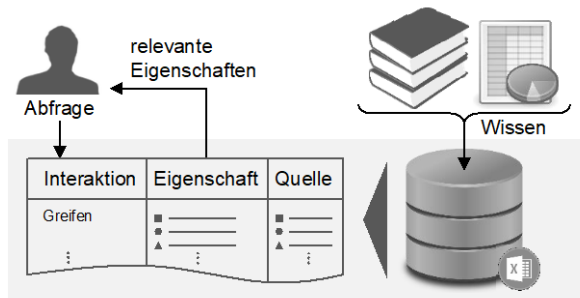


Abbildung 9: Funktionsweise der Wissensdatenbank

Die Rückführung der ausgegebenen Eigenschaften auf spezifische Produktmerkmale in den vorab identifizierten Produktbereichen ist derzeit noch manuell vom Produktentwickler vorzunehmen. Das vorgestellte Konzept ist damit produktübergreifend einsetzbar. Die Eigenschaften sollen dabei v.a. den Produktentwickler auf eine möglichst störfreie Ausgestaltung der Interaktion aufmerksam machen, diese jedoch nicht diktieren. So erfolgt eine Sensibilisierung des Produktentwicklers bei gleichzeitig großem Gestaltungsfreiraum zur Wahrung der Diversität von Produkten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Neben der reinen Funktionserfüllung rückt zunehmend das Erleben von Produkten in den Vordergrund. Die Produktentwicklung kann dabei insbesondere durch die Ausgestaltung der NPI positiven oder negativen Einfluss ausüben. Um den Produktentwickler dabei zu unterstützen, befasst sich dieser Beitrag mit der Identifikation der für die NPI relevanten Eigenschaften, um durch das Fernbleiben von Störgrößen eine positivere UX zu fördern. Hierfür wurden in Kapitel 4.1 zunächst Standardinteraktionen abgeleitet, welche die Grundlage für eine Wissensbasis darstellen (Kapitel 4.2). Darin sind den einzelnen Interaktionen produktübergreifende Eigenschaften zugeordnet, die den Produktentwickler auf die relevanten Aspekte der NPI aufmerksam machen sollen. Das vorgestellte Konzept erhebt im derzeitigen Entwicklungs-

stand nicht den Anspruch, konkrete Gestaltausführungen zu diktieren, sondern soll vielmehr als Gedankenstütze des Produktentwicklers agieren, keine wesentlichen Aspekte zur Gestaltung der NPI zu übersehen. Im weiteren Verlauf ist eine stetige Erweiterung der Wissensbasis sowie eine Erhöhung des Automatisierungsgrades, z. B. durch eine bessere Vernetzung von Eigenschaften und Merkmalen sowie Standardinteraktionen und Produktbereichen vorgesehen. Auch ist langfristig eine Berücksichtigung der Wirkkette vom Produkt mit der Umwelt stärker zu integrieren.

## Danksagung

Das Forschungsvorhaben ist gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer WA 2913/32-1. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

## Literaturverzeichnis

- Baader, F., Horrocks, I., Lutz, C. & Sattler, U. (2017). *An Introduction to Description Logic*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Desmet, P. (2002). *Designing emotions*: Delft University of Technology.
- Desmet, P. M. A. & Pohlmeier, A. E. (2013). Positive Design: An Introduction to Design for Subjective Well-Being. *International Journal of Design*, 7 (3), 5-19.
- DIN EN ISO 9241-210 (2011). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. Berlin: Beuth.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Freudenthal, A. (1999). *The design of home appliances for young and old consumers (Series ageing and ergonomics, Bd. 2)*. Delft: Delft University of Technology.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gilbreth, F. B. (1913). Units, Methods, and Devices of Measurement Under Scientific Management. *Journal of Political Economy*, 21 (7), 618-629.
- Gilbreth, F. B. & Gilbreth, L. M. (1917). *Applied motion study. A collection of papers on the efficient method to industrial preparedness*. New York: Sturgis & Walton Company.
- Glende, S. (2010). *Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung mit Fokus auf die "Generation Plus"*. Dissertation, Technische Universität Berlin. Berlin.
- Hartson, R. & Pyla, P. S. (2012). *The UX book. Process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Amsterdam: Morgan Kaufmann.

- Hassenzahl, M. (2008). User experience (UX): Towards an experiential perspective on product quality. In É. Brangier (Hrsg.), *Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine* (S. 11). New York: ACM.
- Hassenzahl, M., Burmester, M. & Koller, F. (2003). AttrakDiff. Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In G. Szwillus & J. Ziegler (Hrsg.), *Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung* (Bd. 57, Bd. 57, S. 187-196). Stuttgart: Teubner.
- Hassenzahl, M. & Tractinsky, N. (2006). User experience - a research agenda. *Behaviour & Information Technology*, 25 (2), 91-97.
- Kim, Y. S., Lim, J. S. & Park, J. A. (2009). Affordance Feature Reasoning: A Case Study for Human-Product Interaction. In M. N. Bergendahl, M. Grimheden, L. Leifer, P. Skogstad & U. Lindemann (Hrsg.), *Proceedings of ICED 09. The 17th International Conference on Engineering Design: 24-27 August 2009, Stanford University* (S. 429-440). Glasgow: Design Society.
- Kügler, P., Kestel, P., Schon, C., Marian, M., Schleich, B., Staab, S. et al. (2018). Ontology-Based Approach for the Use of Intentional Forgetting in Product Development. In *Proceedings of the DESIGN 2018* (S. 1595-1606).
- Law, E. L.-C., Roto, V., Hassenzahl, M., Vermeeren, A. P.O.S. & Kort, J. (2009). Understanding, scoping and defining user experience: A Survey Approach. In D. R. Olsen, R. B. Arthur, K. Hinckley, M. R. Morris, S. Hudson & S. Greenberg (Hrsg.), *CHI 2009 - digital life, new world. Conference proceedings and extended abstracts; the 27th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 4 - 9, 2009 in Boston, USA* (S. 719-728). New York: ACM.
- Luft, T. & Wartack, S. (2013). Die matrixbasierte Produktbeschreibung als Bestandteil des Vorgehensmodells in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung. In D. Spath, H. Binz & B. Bertsche (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2013. Stuttgart, 20. Juni 2013, Konferenz. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.*
- McCarthy, J. & Wright, P. (2004). *Technology as experience*. Cambridge: MIT Press.
- Norman, D. A. (2002). *The design of everyday things*. New York: Basic Books.
- Norman, D. A. (2005). *Emotional design. Why we love (or hate) everyday things*. New York: Basic Books.
- Ponn, J. & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Quick, J. H., Duncan, J. H. & Malcolm, J. A. (1962). *Work-factor time standards. Measurement of manual and mental work*. New York: McGraw-Hill.
- Saucken, C. C. v. (2017). *Entwicklerzentrierte Hilfsmittel zum Gestalten von Nutzererlebnissen*. Dissertation, Technische Universität München. München.
- Seeger, H. (2005). *Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme*. Berlin: Springer.

- Weber, C. (2005). CPM/PDD - An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In H. Bley, H. Jansen, F.-L. Krause & M. Shpitalni (Hrsg.), Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes (S. 159-179). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Zöller, S. G. & Wartzack, S. (2017). Considering Users' Emotions in Product Development Processes and the Need to Design for Attitudes. In S. Fukuda (Hrsg.), Emotional Engineering (5. Aufl., S. 69-97). Cham: Springer.

## **Kontakt**

Tina Schröppel, M. Sc.  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk  
Martensstraße 9  
91058 Erlangen  
[www.mfk.tf.fau.de](http://www.mfk.tf.fau.de)



## User Experience Design für Sicherheitstechnik – Ansatz und Methodik bei Dräger Safety

Marlene Vogel, Matthias Willner, Christian Wölfel und Jens Krzywinski

Bei der Produktentwicklung von B2B-Produkten erhält das Nutzererleben (User Experience – UX) eine zunehmende Bedeutung (Lu & Roto 2015, Wölfel et al. 2016, Platz et al. 2018, Zeiner et al. 2018, Wölfel & Krzywinski 2019a, b). Dies gilt auch für die Angebote des Unternehmensbereichs Sicherheitstechnik von Dräger. Das Unternehmen entwickelt u. a. Produkte für die Feuerwehr, die chemische Industrie oder den Bergbau (Abbildungen 1 und 2). Das Ziel sind sicher, effizient und zufriedenstellend zu bedienende Produkte, Software und Services.



Abbildung 1: Dräger Pac Eingasmessgerät



Abbildung 2: Dräger HPS 7000 Feuerwehrhelm

Im Rahmen der kontinuierlichen Nutzer- und Kundenevaluation stellt sich eine gute Usability und User Experience als immer wichtiger werdende Anforderungen heraus, welche es zufriedenstellend zu erfüllen gilt. Sie haben zunehmend Einfluss auf die Kaufentscheidung von Anwendern und Kunden in der Sicherheitstechnik. Die Produkte heben sich nicht mehr allein durch ihre Funktionalität vom Wettbewerb ab.

Um den nutzer- und kundenorientierten Anforderungen über den gesamten Produktlebenszyklus in Zukunft noch besser gerecht zu werden, wurden die aktuellen Prozesse analysiert und der Produktdesignprozess hin zu einem nutzerzentrierten UX-Design-Prozess reformiert. Dabei ist die Integration von UX Research und Design in die Produktentwicklung einer der wichtigsten Bestandteile.

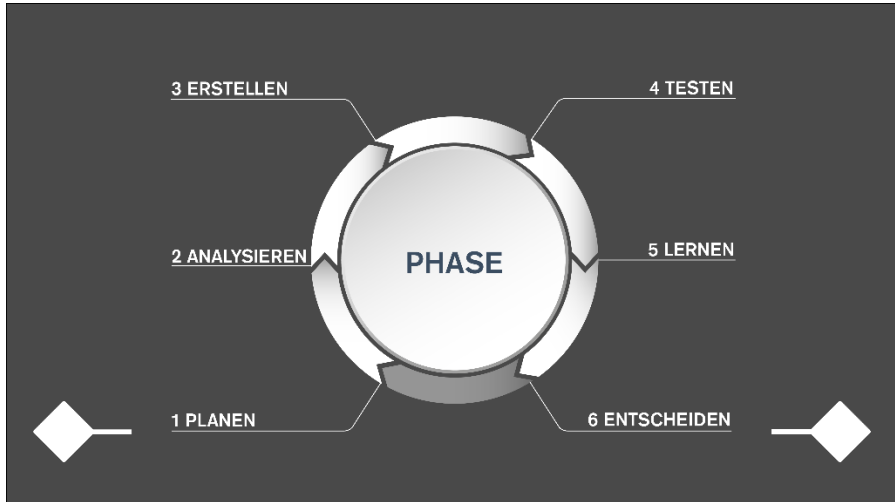


Abbildung 3: Schematischer Ablauf der verschiedenen Phasen im Produktentwicklungsprozess, der in mehreren Iterationen, je nach Projekt, durchlaufen wird.

## User Experience – Modell und Definition bei Dräger Safety

Zur Erklärung des Phänomens User Experience steht – mit unterschiedlichen Bezeichnungen – eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle zur Verfügung. Diese reichen von sehr grundlegenden und allgemeingültigen Modellen zur Beschreibung des Zusammenspiels von Kognition und Emotion bei der Mensch-Produkt-Interaktion (Uhlmann 2012, Uhlmann et al. 2016) bis hin zu sehr spezifischen Zusammenhängen in sehr spezifischen Anwendungsfeldern (z. B. Servizi et al. 2018 zum Erleben von Datenschutz bei TV-Empfehlungen). Viele der Modelle beziehen sich auf Komponenten der User Experience. Hervorzuheben ist das Modell von Thüring und Mahlke (2007), das Einflussfaktoren, Komponenten und Konsequenzen der User Experience in einen kausalen Zusammenhang stellt – und damit einen Ansatz für die Produktentwicklung bietet. Dieses für kommerzielle interaktive (Software-) Produkte entwickelte Modell lässt sich prinzipiell auf physische und cyber-physische Produkte übertragen und für professionelle Kontexte adaptieren (Wölfel & Krzywinski 2019a, b). Wölfel und Krzywinski zeigen, wie sich die akademischen Modelle von Uhlmann sowie Thüring und Mahlke mit dem aus der Berufspraxis abgeleiteten Modell von Andersson (2006, vgl. Wölfel et al.

2013) verbinden lässt. Das Modell von Andersson kann als detailliertere Aufschlüsselung der Was-Wie-Warum-Ebenen von Hassenzahl et al. (2010) aufgefasst und als UX-Qualitäten auf das Industriedesign übertragen werden (Wölfel 2011, Wölfel et al. 2013). Die Integration der hierarchisch von instrumentell (also aufgabenbezogenen) zu nicht-instrumentell geordneten UX-Qualitäten in das Modell der UX-Komponenten erlaubt eine zusammenhängende Darstellung der Einflussfaktoren und der UX-Qualitäten zusammen mit den Konsequenzen. Und bringt somit beschreibbar und perspektivisch messbare Faktoren in Zusammenhang (Wölfel & Krzywinski 2019). In Erweiterung des Modells von Thüring und Mahlke wurden die Einflussfaktoren Angebot (System) und Aufgabe einerseits separat aufgeführt sowie design- und arbeitswissenschaftlich untersetzt (ibid.).

Der zugrundeliegende Designansatz mit den entsprechenden Prozessen und Methoden ermöglicht eine Adaption für Dräger Safety, die einerseits eine Verankerung in akademischer Forschung absichert und zugleich die Passfähigkeit mit industrieller Praxis sicherstellt. Die gemeinsam für Dräger Safety weiterentwickelten Definition und Modell der User Experience sind die Basis für die jeweiligen UX-Designprozesse und -methoden.

Die UX-Definition und das UX-Modell verdeutlichen das Gesamtziels der UX-Design-Anstrengungen von Dräger Safety und der zugrundeliegenden Prinzipien. Die erforderliche Anpassung des UX-Designprozesses und der Methoden für jedes Angebot von Dräger kann auf der Definition, dem Modell und den Werten von Dräger UX aufbauen.

UX ist definiert als ein ganzheitliches Konstrukt, das Urteile und Kauf sowie das Verhalten in professionellen Märkten und Arbeitsumgebungen beeinflusst. Es bezieht sich auf die Hypothese, dass positive Erfahrungen und die Befriedigung psychologischer Bedürfnisse die Qualität der Arbeit und das Gesamturteil gegenüber Dräger und seinen Angeboten verbessern.

Das kausale UX-Modell illustriert die beeinflussenden Faktoren Person, Aufgabe, Angebot, Kontext und Interaktion, die UX-Komponenten affektive (einschließlich emotionale) und kognitive Verarbeitung instrumenteller und nicht-instrumenteller Qualitäten und schließlich die UX-Auswirkungen auf die Gesamtbeurteilung und das Verhalten gegenüber dem Angebot.

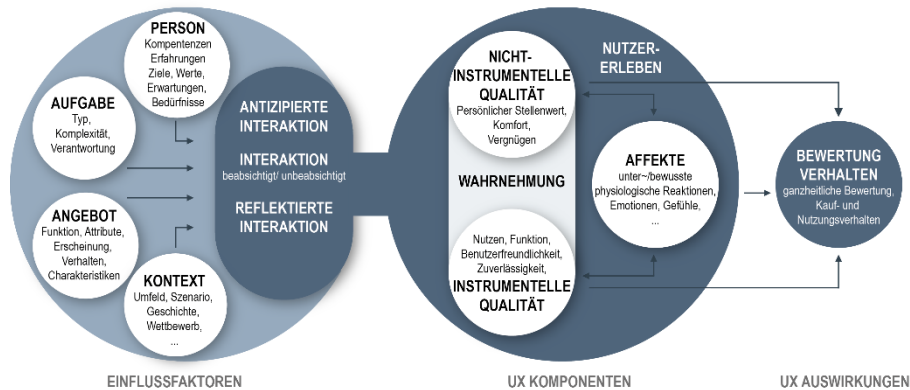


Abbildung 4: Dräger Safety UX model, basierend auf Thüring & Mahlke 2007, Anderson 2006, Wölfel et al. 2013, Wölfel & Krzywinski 2019a, b

In Ergänzung zum in Abbildung 4 dargestellten UX-Modell definiert Dräger Safety User Experience folgendermaßen:

Dräger definiert für sich das Nutzererleben als holistisches Konstrukt, welches zwar bezüglich einzelner Einflussfaktoren, Komponenten, oder Qualitäten beschrieben und evaluiert werden kann, aber nur ganzheitlich funktinieren und entsprechend gestaltet werden kann. Dieses holistische Konstrukt dient als Basis für den UX-Design-Ansatz in der Produktentwicklung. Mit Hilfe dieses Ansatzes will Dräger erfolgreiche und wettbewerbsfähige Produkte und Services entwickeln und auf den Markt bringen.

Das Erleben eines Angebots im B2B-Markt und einer entsprechenden Arbeitsumgebung prägt die Gesamtbewertung dieses Angebots und beeinflusst somit das Kauf- und Nutzerverhalten.

Ein positives Erleben und die Befriedigung psychologischer Bedürfnisse tragen u. a. zu:

- einer erhöhten (Arbeits-)Motivation,
- einer gesteigerten Resilienz,
- einer verbesserten (Arbeits-)Qualität und Sicherheit und
- langfristig betrachtet einer Reduktion der Arbeitnehmerfluktuation bei.

## Der User-Experience-Design-Prozess (Dräger Safety)

Der User-Experience- (UX-) Design-Prozess der Dräger Safety ist ein Stage-Gate-Prozess, in dem innerhalb der Phasen agile Methoden und der Ansatz des Design Thinkings zum Tragen kommen. Er unterteilt sich in fünf Phasen: Exploration, Konzept, Lösung, Umsetzung und Lifecycle.

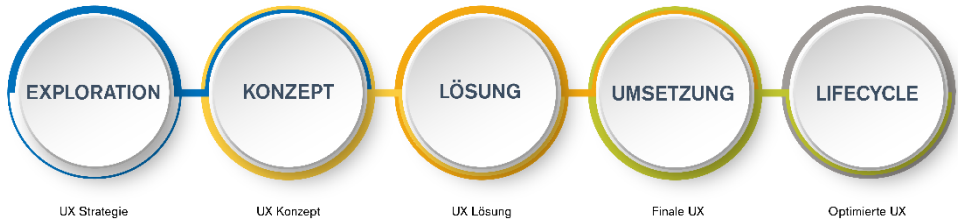


Abbildung 5: UX-Design-Prozess Dräger Safety

### 1. Exploration:

Im Rahmen der Explorationsphase werden Arbeitsabläufe des Anwenders und Kunden, sowie globale und gesellschaftliche Trends analysiert. Basierend darauf werden Ideen für die zukünftige Roadmap in Form einer UX-Strategie generiert.

### 2. Konzept:

Zu Beginn der Konzeptionsphase findet eine genaue Anforderungsanalyse für die Entwicklung statt. Diese kann sich auf Software, Hardware, Verpackung, Service und andere Komponenten, die im Laufe des Produktlebenszyklus relevant sind, beziehen und dabei alle Sinne ansprechen.

Die Anforderungen in technische Anforderungen und erste Konzepte umzusetzen ist Kern dieser Phase. Die Konzepte werden iterativ getestet und sukzessiv weiterentwickelt.

### 3. Lösung:

Die kontinuierliche Weiterentwicklung, Detaillierung und Evaluation der Konzepte führt schlussendlich zu einer finalen UX-Lösung, wobei die jeweiligen UX-Aspekte je Hauptschnittstelle (Touchpoints) spezifiziert sind und eine Designlösung vorliegt.

#### 4. Umsetzung:

Die finale UX-Lösung wird anschließend durch die Entwicklung in erste Funktionsprototypen umgesetzt. Je nach Gewerk können hier Art und Zyklus der Abstimmungen mit den jeweiligen Entwicklungsbereichen unterschiedlich ausfallen (Software, Mechanik, Elektronik). Das finale Konzept wird anschließend im Feld mit realistischen Materialien hinsichtlich der finalen User Experience getestet. Am Ende dieser Umsetzungsphase liegt ein Produkt mit hoher UX-Qualität vor, welches zu einer exzellenten Nutzererfahrung beim Anwender führt.

#### 5. Lifecycle:

Das Produkt wird an das Lifecycle Management übergeben und das finale Nutzererleben wird untersucht. Rückmeldungen fließen in Abstimmung mit dem Qualitätsmanagement in die weitere Optimierung des Produkts ein.

### Methoden für das UX Design von Sicherheitstechnik

Der UX-Design-Prozess läuft verzahnt mit allen anderen Prozessen der Produktentwicklung und den entsprechenden etablierten Methoden. Darüber hinaus wurden einige spezifische UX-Design-Methoden entwickelt, um den Fokus auf die Ziele des UX-Designs während des gesamten Prozesses zu gewährleisten.

Die UX-Design-Methoden sind weitgehend modular aufgebaut und stark miteinander verbunden. So stellt beispielsweise der *UX-Design-Brief* eine eher abstrakte Definition des Entwicklungsziels mit einem starken Fokus auf nicht-instrumentelle Qualitäten dar. Die instrumentellen Qualitäten werden über etablierte Tools wie Anforderungslisten beschrieben. Die Zielgrößen der nicht-instrumentellen Qualitäten werden zunächst über die Vorgabe der *Dräger UX Goals*, *UX Personas*, *UX Scenarios*, der Charakterisierung der Arbeitsaufgaben und damit verbundener *Empathy Maps* eingegrenzt. Wesentliche Elemente des Design-Briefs werden im weiteren Prozess Teil der *UX Journey Map*, die wiederum als Verhandlungsgegenstand in regelmäßigen, strukturierten *UX Alignment Meetings* dienen.

Die Eingangsdaten für die UX-Design-Methoden sind dabei nicht fiktiv, sondern durch Erkenntnisse des eigenen User Research und aus dem Vertrieb

abgesichert. Entsprechend erfolgen auch Zwischenevaluierung und abschließende Bewertungen methodisch im Abgleich mit den Zielgrößen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein Modul-Template, das zur Visualisierung der Soll-/Ist-Vergleiche der relevanten UX-Zielgrößen für alle relevanten Touchpoints auf der UX Journey Map verwendet wird.

Die UX-Qualität mit Probanden zu messen ist vor und während der Exploration hilfreich, um UX-Probleme zu entdecken. Es wird auch während der Entwicklung und Realisierung eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Entwicklungsziele erreicht werden.

Die UX-Qualitäten mittels Expertenbewertungen zu bestimmen ist vor allem dann sinnvoll, wenn der Entwicklungsstand aufgrund eines hohen Abstraktionsgrads oder einfachen Prototypenstatus eine Evaluierung mit Probanden nicht erlaubt. Die Expertenbewertung kann auch zwischen Probandenevaluierungen eingesetzt werden, um Ressourcen einzusparen.

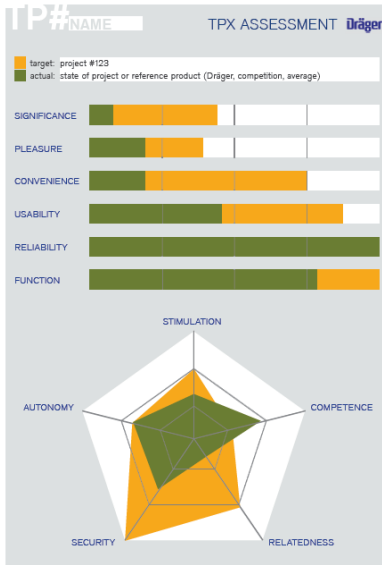


Abbildung 6: Beispiel eines Modul-Templates für die Journey Map für die standardisierte Darstellung von Soll-/Ist-Vergleichen der relevanten UX-Zielgrößen.



Aufgrund unterschiedlicher Angebote, Budgets, Branchen und unterschiedlicher Arten von Lösungsrepräsentationen gibt es keine singuläre Methode zur Evaluierung der UX-Qualitäten, weder durch Experteneinschätzungen noch durch Probandentests. Stattdessen muss der User Research Bewertungsverfahren auswählen und an die Einschränkungen und Möglichkeiten innerhalb des Projekts anpassen. Der Prozess der Datenerfassung und -analyse muss variieren. Die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse ist allerdings auf einige wenige nicht-instrumentelle und instrumentelle UX-Qualitäten und die (potenzielle) Erfüllung psychologischer Bedürfnisse standardisiert. Die UX-Evaluierung kann Usability-Tests, Beobachtungen, Interviews, Fragebögen und andere Methoden umfassen. Besonderes Augenmerk muss auf der Bewertung nicht-instrumenteller Qualitäten und Bedürfnisse liegen.

### **Adaption und Evaluierung von Ansatz und Modell im Unternehmen**

Im Rahmen der UX-Design-Prozessentwicklung fand eine intensive Abstimmung mit angrenzenden Fachbereichen statt. Diese interne Evaluierung sowohl des UX Models, der UX Definition als auch des UX-Design-Prozesses fand im Rahmen von Workshops mit Produktmanagement, Marketing, Corporate Communications, Entwicklungsabteilung (Software, Mechanik, Elektronik, technische Dokumentation), Qualität als auch der Verifikations- und Validierungsabteilung statt. Mit den Rückmeldungen der jeweiligen Bereiche wurden die UX-Elemente (Model, Definition, Prozess) so optimiert, dass effizient innovative Produkte entwickelt werden können. Es wurde das Rollenverständnis von UX Research und UX Design geschärft und die Verantwortlichkeiten für die jeweiligen Schnittstellen im Produktlebenszyklus definiert. Dies ist ein weiterer wichtiger Baustein, um das Design weiter strategisch im Unternehmen zu verankern.

### **Diskussion und Ausblick**

Im nächsten Schritt werden im Rahmen von Pilotprojekten die erarbeiteten Tools angewandt und optimiert. Es wird eine Abstimmung mit dem Medizintechnikbereich zu dem erarbeiteten UX Model und der UX-Definition stattfinden und ein UX-Training für die Organisation etabliert werden.

Erfahrungen aus den Projekten werden kontinuierlich in die Weiterentwicklung des UX Models und der Definition, sowie des UX-Design-Prozesses einfließen, um eine bestmöglich Nutzung in der Praxis sowohl im Research als auch im Design zu gewährleisten. Gleichzeitig wird überprüft, inwieweit die Erfolge anhand einer Balance Score Card z. B. für das Management nachweisbar gemacht werden können.

## Literaturverzeichnis

- Anderson, S. P. (2006). Creating Pleasurable Interfaces. Getting from Tasks to Experiences. Zugriff am 08.01.2019. Verfügbar unter [http://poetpainter.com/thoughts/file\\_download/7](http://poetpainter.com/thoughts/file_download/7).
- Hassenzahl, M., Diefenbach, S. & Göritz, A. (2010). Needs, affect, and interactive products – Facets of user experience. *Interacting with Computers*, 22, 353–362.
- Lu, Y. & Roto, V. (2015). Evoking meaningful experiences at work – a positive design framework for work tools. *Journal of Engineering Design*, 26, 99–120.
- Platz, A., Burmester, M. & Urbas, L. (2018). Digital Companion. In R. Dachselt & G. Weber (Hrsg.), *Mensch und Computer 2018. Workshopband*. Bonn: Gesellschaft für Informatik e. V.
- Thüring, M. & Mahlke, S. (2007). Usability, aesthetics and emotions in human–technology interaction. *International Journal of Psychology*, 42, 253–264.
- Wölfel, C., Siwek, S. & Krzywinski, J. (2016). The concept of product experience in industrial goods development. In L. Blessing, A. J. Qureshi & K. Gericke (Hrsg.), *The Future of Transdisciplinary Design. Proceedings of the Workshop on “The Future of Transdisciplinary Design”*, University of Luxembourg 2013. London: Springer.
- Wölfel, C. & Krzywinski, J. (2019a). Ansatz und Modell der User Experience cyber-physischer Systeme in professionellen Kontexten und dessen Kommunikation in Industriegüterunternehmen. In: GfA, Dortmund (Hrsg.): *Frühjahrskongress 2019, Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten*.
- Wölfel, C. & Krzywinski, J. (2019b). Human Needs as the Crux of the Matter in Product-Service Systems Development. In: Y. Erisksson, K. Paetzold (Hrsg.) *Human Behaviour in Design, Proceedings of the 2nd SIG conference HBiD2019*. Invited Keynote.
- Servizi, V., Kosta, S., Hammershøj, A. D. & Olesen, H. (2018): A User Experience Model for Privacy and Context Aware Over-the-Top (OTT) TV Recommendations. In: *SIR: Workshop on Social Interaction-based Recommendation: The 27th International Conference on Information and Knowledge Management*
- Uhlmann, J. (2012). Erleben – Ein Grundbegriff für das Design. In: M. Linke et al. (Hrsg.) *Entwerfen Entwickeln Erleben [2012]. Technisches Design in Forschung, Lehre und Praxis*. Dresden: TUDpress, 11–36.

- Wölfel, C., Krzywinski, J. & Drechsel, F. (2013). Knowing, reasoning and visualizing in industrial design. The Knowledge Engineering Review, 28, 287–302.
- Uhlmann, J., Wölfel, C. & Krzywinski, J. (2016). Experience. A central Concept in Design and its Roots in the History of Science. In Proceedings of DRS 2016, Design Research Society 50<sup>th</sup> Anniversary Conference. Brighton.
- Zeiner, K. M., Burmester, M., Haasler, K., Henschel, J., Laib, M. & Schippert, K. (2018). Designing for Positive User Experience in Work Contexts: Experience Categories and their Applications. Human Technology, 14, 140–175.

## Kontakt

Dr. phil. Marlene Vogel  
 Dipl.-Des. Matthias Willner  
 Dräger Safety AG & Co. KGaA  
 Revalstraße 1  
 23560 Lübeck, Germany  
[www.draeger.com](http://www.draeger.com)

Dr.-Ing. Christian Wölfel  
 Prof. Dr.-Ing. Jens Krzywinski  
 Technische Universität Dresden  
 Professur für Technisches Design  
 01062 Dresden  
[www.tu-dresden.de/design](http://www.tu-dresden.de/design)



## 3D-volldigitalisierte Behandlungsplanung bei Lippen-Kiefer-Gaumenspalten

Christiane Kunert-Keil, Dominik Haim, Karol Kozak, Ines Zeidler-Rentsch, Bernhard Weiland, Olaf Müller, Thomas Treichel und Günter Lauer

### Einleitung

Die Idealvorstellung eines vollständig digitalisierten Behandlungsalltags rückt mit fortschreitender technologischer und informationeller Entwicklung stetig näher an die Realität. Zu Beginn bestand lediglich die Möglichkeit einer elektronischen Patientenakte, hinzu kamen vielfältige Möglichkeiten der digitalen Bildgebung und wurden schließlich um das Ziel eines vollständigen digitalen Workflows ergänzt. Die Planung der interdisziplinären kieferorthopädischen / kieferchirurgischen Versorgung von Patienten mit Lippen-Kiefer-Gaumenspalten (LKGS) wird momentan noch hauptsächlich analog durchgeführt. Eine volldigitalisierte Behandlungsplanung und –freigabe unter intersektoraler Einbeziehung aller beteiligten Behandler findet nicht statt. Neu entwickelte, digitale kieferorthopädische und –chirurgische Produkte, welche bis vor ein paar Jahren noch nicht denkbar waren, unterstützen den digitalen Workflow maßgeblich. 3D-Scanner und 3D-Fotoaufnahmen erstellen digitale Modelle, deren Daten zur Integration in den digitalen Workflow durch Softwareprozesse verarbeitet werden müssen. Um einen einfachen und strukturierten Zugriff auf die gesamten 3D Daten zu gewährleisten, ist die Idee entstanden, die anfallenden Daten und Unterlagen zu digitalisieren und in einer für diesen Zweck entwickelten Datenbank zu speichern und zu bearbeiten. Die konsequente Verwendung von digitalen 3D-Analysen und der Verzicht auf die aufwändige Erstellung der Diagnostik- und Therapieplanung aus einer Kombination von Gipsmodellen und 2D-Daten (z.B. Röntgenbilder) führen zu einer fundamentalen und richtungsweisenden Veränderung des Behand-

lungsplanungsprozesses. Räumlich und monetär aufwendige Bearbeitungsprozesse werden eingespart und Behandlungspläne können rascher erstellt werden, da sich alle notwendigen Unterlagen gebündelt in einem System wiederfinden. Weiterhin wird die Strahlenbelastung der Patienten wesentlich verringert, da eine Doppeldiagnostik durch mehrmaliges Anfertigen von Röntgenaufnahmen, DVTs und CTs in verschiedenen Abteilungen vermieden wird. Die Kommunikation, der Austausch und die konsiliarische Zusammenarbeit zwischen den Behandlern erfolgt unter Verwendung der europaweit ersten offenen, überregionalen telemedizinischen Plattform zur Verbesserung der medizinischen Versorgung – CCS TELEHEALTH OSTSACHSEN (THOS).

## Zielstellung

Ziel des aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und des Freistaates Sachsen in Höhe von bis zu 800.000 Euro geförderten Projektes ist die Nutzung einer digitalen Plattform zur interdisziplinären medizinischen / zahnmedizinischen Versorgung von LKGS-Patienten (Abbildung 1).



Abbildung 1: Logo des EFRE-Projektes „LKGS-3D“

Dazu wird die aktuell verwendete Kombination aus 2D-Daten (Röntgenaufnahmen, extraorale und intraorale Fotos) und Herstellung von Gipsmodellen in eine digitale Analyse überführt. Dies geschieht in mehreren Stufen.

- Zuerst wird die bisher erforderliche Abdrucknahme mittels Alginate und die anschließende Herstellung eines Gipsmodells durch einen intraoralen 3D-Scan der Zahnbögen des Patienten abgelöst. Anhand des intraoralen 3D-Scans können dann die erforderlichen Trinkplatten mittels 3D-Druck erstellt werden.
- Zweiter Schritt ist die Anfertigung von 3D-Aufnahmen der Weichteile des Gesichtes mittels eines extraoralen 3D-Scanners.
- Als dritter Schritt erfolgt die Anfertigung von Digitalen Volumentomografie (DVT)-Aufnahmen zur 3D-Darstellung des Schädelsknochens und Kieferskeletts.

Nach der Anfertigung werden diese bildbasierten Datensätze zu einem „digitalen Zwilling“ (virtuelles 3D-Modell aus DVT, intra- und extraoralen 3D-Scan) zusammengefasst, wodurch erstmalig ein umfassendes 3D-Modell des Mund-Kiefer-Raumes einschließlich wichtiger Informationen zum Kiefergelenk und der anliegenden Weichteile entsteht. Dieses virtuelle Modell bildet die Grundlage der Behandlungsplanung der Patienten, der fachlichen Diskussion mit Konsilexperten sowie der Freigabe dieser Behandlungsplanung durch die Kostenträger (Abbildung 2).

Mit Hilfe der Plattform sollen drei Schwerpunkte innerhalb des Projektes bearbeitet werden:

1. Vollständige 3D-Digitalisierung des ärztlichen / zahnärztlichen Planungs- und Freigabeprozesses
2. Optimierung der Behandlungsplanung und Verminderung der Strahlenbelastung bei Neugeborenen und Kindern mit LKGS
3. Intersektorale Vernetzung der kieferchirurgischen / kieferorthopädischen Behandler in Sachsen

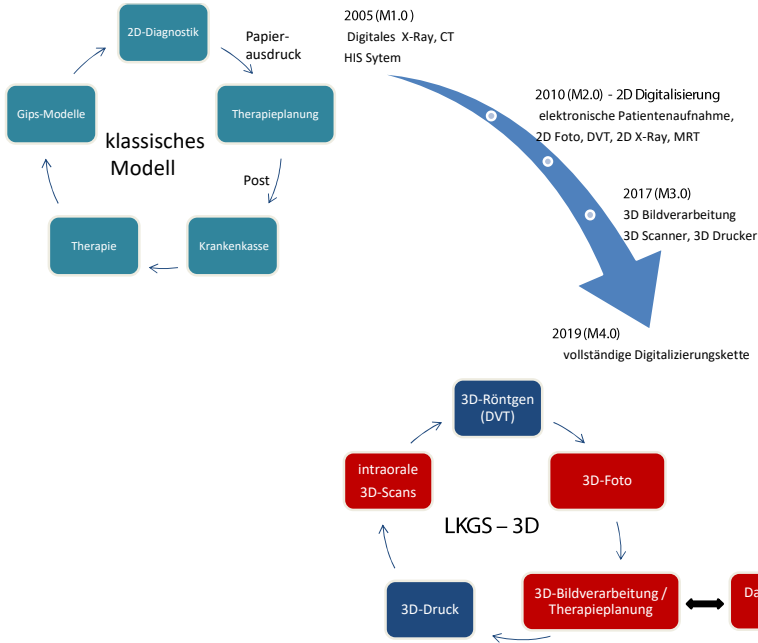


Abbildung 2: Darstellung der Ausgangssituation, der digitalen Entwicklung in den letzten Jahren und des geplanten digitalen Prozesses für die Diagnostik- und Therapieplanung in der Behandlung von LKGS-Patienten. Rot markierte Felder sollen im Projekt bereitgestellt bzw. geschaffen werden.

## Umsetzung

Zu Schwerpunkt 1:

Neben Systemen für dreidimensionale DVT-Aufnahmen sind zahlreiche Systeme im Bereich Modell- und Abdruckscanner sowie der intraoralen Scanner (puderfrei oder mit Notwendigkeit einer vorherigen, intraoralen Puderung) auf dem Markt erhältlich. Neben der einfachen Digitalisierung von vorhandenen Gipsmodellen können die Modellanalyse, sowie die digitale Behandlungsplanerstellung und die Erstellung eines digitalen Setups bereits am Computer stattfinden. In der allgemeinen Zahnheilkunde findet ein solches System, welches mehrere diagnostische Methoden verknüpft, bereits vielfach Anwendung. Das technisch aufwändige Gesamtkonzept des Cerec-Systems besteht aus einem Kamerasystem zur optischen Abformung, einer 3D-



Software zum Konstruieren des gewünschten Zahnersatzes (CAD-Verfahren) und einem Schleifsystem mit Elektromotoren, das den Zahnersatz aus einem industriell hergestellten Keramikblock (CAM-Verfahren) innerhalb weniger Minuten herausfräst. Unter CAD/CAM versteht man in der Zahnmedizin eine Technik zur Herstellung von Zahnersatz mit Hilfe einer computergesteuerten Maschine. „CAD“ steht für „Computer Aided Design“, also einem virtuellen Entwurf des Zahnersatzes am PC nach Erfassung der Situation im Mund und „CAM“ steht für „Computer Aided Manufacturing“, also dem eigentlichen Herstellungsprozess mittels einer selbstständig fräsenden Einheit). Über das CAD/CAM-Verfahren ist möglich, Trinkplatten für LKGS-Patienten anzufertigen (Bauer et al., 2017). Seit kurzem besteht die Möglichkeit, Gipsmodelle von Zahnabdrücken mit Hilfe von 3D-Scannern zu digitalisieren. Es konnte gezeigt werden, dass die digitale Abformung mit der klassischen Abformung in der Präzision qualitativ vergleichbar ist (ten Hagen, 2013). Eine durchgeführte Marktanalyse für Intraoralscanner ergab 16 momentan erhältliche Scansysteme, wovon der überwiegende Teil bereits puderfrei arbeitet, was Voraussetzung für die Anwendbarkeit in diesem Projekt ist. Der Einsatz von Intraoral-Scannern bei LKGS ist bisher nur wenig beschrieben. Es existiert lediglich eine Veröffentlichung / Arbeit, die beschreibt, dass mit Hilfe eines solchen Scanners die Gaumen von Kleinkindern mit LKGS zur Herstellung von Trinkplatten abgescannt werden konnten (Krey et al., 2018).

Der von Krey et al. genutzte Intraoral-Scanner wurde im hier beschriebenen Projekt an einem 9 Monate alten Kind mit LKGS getestet. Die Durchführung des Scans war möglich, allerdings benötigte dieser mehr als 5 Minuten, was wiederum bei einem Kind von unter einem Jahr zu Schwierigkeiten führt (Stillliegen). Ein weiteres Problem offenbarte sich in der Tatsache, dass der Scanner sehr oft den Scan abbrach, da er die Strukturen nicht erkannte. Daraufhin kam ein weiteres Modell eines anderen Herstellers zur Anwendung (die getesteten Intraoral-Scanner können beim Verfasser angefragt werden). Der Intraoralscan wurde sowohl an einem 6 Monate als auch an einem 9 Monate alten Kind ausprobiert. Beide Scans waren völlig unkompliziert und problemlos. Es wurden während der höchstens 3-minütigen Scandauer alle Strukturen erkannt. (siehe Abbildung 3). Hervorzuheben ist auch, dass dieser Scanner sich auch zur Digitalisierung der Weichteile, wie Lippe und Nase (Abbildung 4) eignet.

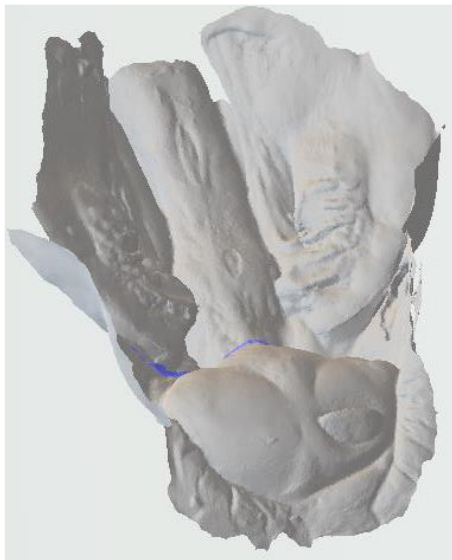


Abbildung 3: Intraoralscan des Oberkiefers eines 9 Monate alten Kindes mit LKS

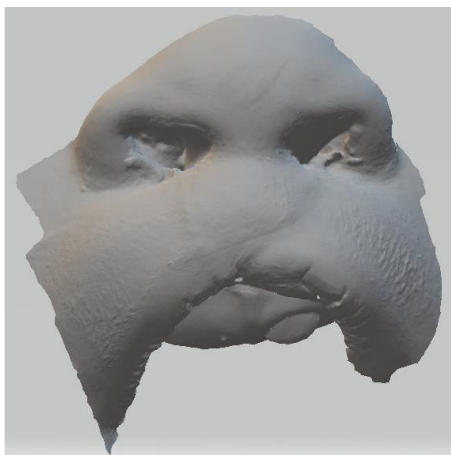


Abbildung 4: 3D-Scan der Oberlippe und der Nase eines 9 Monate alten Kindes mit LKS

Um die Weichteile des Gesichts komplett digital darstellen zu können, eignen sich sogenannte Extraoralscanner. Laut Marktanalyse konnten für das Projekt fünf geeignete Systeme identifiziert werden. Problematisch bei allen herkömmlichen Systemen ist die lange Scandauer (ca. 3 min), bei der sich der Patient nicht bewegen darf. Da dies bei Kleinkindern nahezu unmöglich ist, könnte eine Alternative die Photogrammetrie (seltener auch Fotogrammetrie oder Bildmessung) sein. Photogrammetrie wird ursprünglich in der Geländevermessung eingesetzt und ist eigentlich kein klassisches 3D-Scan-Verfahren, sondern ein Rekonstruktions-Verfahren. Das Gesicht des Patienten wird mit natürlichem Licht und von mehreren Kameras aus verschiedenen Positionen und Winkeln gleichzeitig aufgenommen (Dauer: <1 sec). Anschließend wird mit Hilfe der Fotografien und genauen Messbildern eines Objektes seine räumliche Lage oder dreidimensionale Form bestimmt (de Menezes et al., 2010). In ersten Versuchen konnte bewiesen werden, dass dieses Verfahren für medizinische Anwendungen nutzbar ist. Mittels 3D Stereophotogrammetrie lassen sich die Weichteile von LKGS-Patienten sehr gut vermessen und beurteilen (Ozdemir and Esenlik, 2018).

Für die Umsetzung der volldigitalen Behandlungsplanung war es zunächst notwendig, den gesamten Behandlungsprozess vollständig zu ermitteln und zu hinterfragen. Von zentraler Bedeutung in diesem Prozess ist die Art und der Zeitpunkt der jeweils angewandten Diagnostik im Behandlungsverlauf sowie deren Dokumentation. Ferner wurden Anwender- bzw. Nutzerrollen und die damit verbundene Dokumentations- und Zugriffsrechte spezifiziert.

Erste Schritte für die Fusion verschiedener diagnostischer Unterlagen (z.B. Röntgenbilder, Extraoralbilder) wurden bereits unternommen. So können unter anderem die 2D-Röntgenaufnahmen, sowie die extraoralen Fotos und die kephalometrische Auswertung zu sogenannten Fusionsmodellen zusammengefügt werden (Abbildung 5). Außerdem ist es bereits gelungen, die 3D-Scans des Gaumens bzw. der Nase eines Patienten miteinander zu fusionieren.

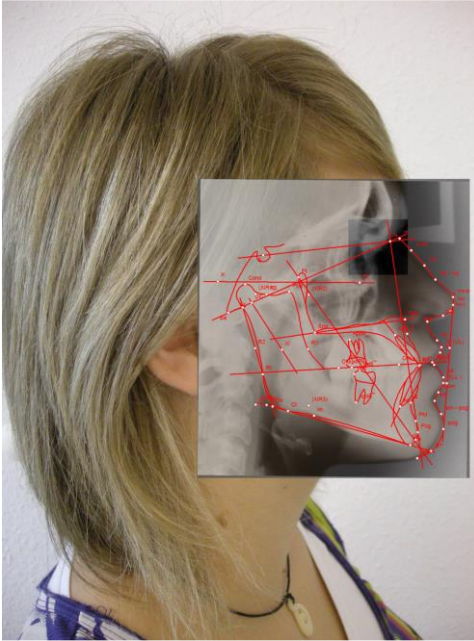


Abbildung 5: Fusionsbild aus 2D-Röntgen- und extraoralem Bild sowie kephalometrischer Auswertung einer Patientin mit Hilfe der ivoris analyze 3D Software

## Zu Schwerpunkt 2:

Zweiter großer Schwerpunkt des Projektes beschäftigt sich mit Alternativen zur digitalen Volumentomographie (DVT) bzw. Computertomographie (CT). Das DVT nutzt Röntgenstrahlen als Grundlage des dreidimensionalen, bildgebenden Tomographie-Verfahrens. Für das Verfahren typisch sind eine isometrische Ortsauflösung im Volumen in allen drei Raumrichtungen sowie die Konzentration auf die Darstellung von Hochkontrast, d. h. auf Hartgewebe (Knochen). Es ist inzwischen bekannt, dass Knochen auch mit Hilfe von Ultraschall dargestellt werden können. Auch LKGS können bereits im Mutterleib mittels 2D- und 3D-Ultraschall diagnostiziert werden. Inzwischen ist die Technik soweit ausgereift, dass bereits in der 14. Schwangerschaftswoche eine Diagnose erfolgen kann (Marginean et al., 2018). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass Ultraschall in der Lage ist, wichtige Merkmale der Knochen- und Sehnenpathologie zu charakterisieren, so unter anderem Veränderungen bei entzündlicher Arthritis, wie z.B. Sehnnenscheidenentzündung

(Miller et al., 2019). Auch lässt sich die Knochendicke mit Hilfe des Ultraschalls bestimmen (Degen et al., 2017). In einer Pilotstudie konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von Ultraschall in 80% der untersuchten Fälle Knochenbrüche von gesunden Knochen unterschieden werden können (Champagne et al., 2019; Ghavami et al., 2019).

Im Rahmen des Projektes ist die Analyse der auf dem Markt zur Verfügung stehenden Ultraschallgeräte mit 3D-Ultrabreitbandtechnologie (Grundvoraussetzung für die Anwendung im Bereich Zahnmedizin), inzwischen abgeschlossen. Ein entsprechendes Gerät wurde identifiziert und befindet sich im Vergabeverfahren.

Zu Schwerpunkt 3:

Zur besseren Versorgung der Patienten ist es erforderlich, eine Vernetzung der überwiegend städtischen Versorgungszentren mit Praxen im ländlichen Raum herzustellen. Mit THOS steht bereits eine offene Kommunikationsplattform für medizinische Anwendungen zur Verfügung. Auf Basis der durchgängigen Informationsbereitstellung als Grundvoraussetzung einer integrierten Versorgungsstruktur soll damit eine bessere Zugänglichkeit zu medizinischen / zahnmedizinischen Leistungen, insbesondere in strukturschwachen ländlichen Bereichen, gewährleistet werden. Die angestrebte Projektentwicklung soll, auf Basis gemeinsamer internationaler Standards (u.a. IHE), die bereitgestellten standardisierten Schnittstellen nutzen um den spezifischen Betreuungspfad LKGS elektronisch abzubilden. Hierfür sind jeweils Anpassungen an der Schnittstelle zwischen der innovativen Anwendung, der THOS-Plattform und des Praxissystems zu erwarten.

Die geplante ambulante Anbindung soll zügig realisiert werden. Dafür wurde bereits gemeinsam mit den Projektpartnern Kontakt zu mehreren kieferchirurgischen / kieferorthopädischen Praxen aufgenommen. Derzeit werden die technische Bedingungen und Voraussetzungen eruiert.

## Literaturverzeichnis

Bauer, FX, Gull, FD, Roth, M, Ritschl, LM, Rau, A, Gau, D, Gruber, M, Eblenkamp, M, Hilmer, B, Wolff, KD & Loeffelbein, DJ. (2017): A prospective longitudinal study of postnatal dentoalveolar and palatal growth: The anatomical basis for CAD/CAM-assisted production of cleft-lip-palate feeding plates. In: Clin Anat, 30 (7), 846-854

- Champagne, N, Eadie, L, Regan, L & Wilson, P. (2019): The effectiveness of ultrasound in the detection of fractures in adults with suspected upper or lower limb injury: a systematic review and subgroup meta-analysis. In: *BMC Emerg Med*, 19 (1), 17
- de Menezes, M, Rosati, R, Ferrario, VF & Sforza, C. (2010): Accuracy and reproducibility of a 3-dimensional stereophotogrammetric imaging system. In: *J Oral Maxillofac Surg*, 68 (9), 2129-2135
- Degen, K, Habor, D, Radermacher, K, Heger, S, Kern, JS, Wolfart, S & Marotti, J. (2017): Assessment of cortical bone thickness using ultrasound. In: *Clin Oral Implants Res*, 28 (5), 520-528
- Ghavami, S, Gregory, A, Webb, J, Bayat, M, Denis, M, Kumar, V, Milbrand, TA, Larson, AN, Fatemi, M & Alizad, A. (2019): Ultrasound Radiation Force for the Assessment of Bone Fracture Healing in Children: An In Vivo Pilot Study. In: *Sensors (Basel)*, 19 (4),
- Krey, KF, Ratzmann, A, Metelmann, PH, Hartmann, M, Ruge, S & Kordass, B. (2018): Fully digital workflow for presurgical orthodontic plate in cleft lip and palate patients. In: *Int J Comput Dent*, 21 (3), 251-259
- Marginean, C, Sasarean, V, Marginean, CO, Melit, LE & Marginean, MO. (2018): Prenatal diagnosis of cleft lip and cleft lip palate - a case series. In: *Med Ultrason*, 20 (4), 531-535
- Miller, JB, Danoff, SK, Bingham, CO, 3rd, Paik, JJ, Mecoli, CA, Tiniakou, E, Christopher-Stine, L & Albayda, J. (2019): Sonographic findings from inflammatory arthritis due to antisynthetase syndrome. In: *Clin Rheumatol*,
- Ozdemir, SA & Esenlik, E. (2018): Three-Dimensional Soft-Tissue Evaluation in Patients with Cleft Lip and Palate. In: *Medical Science Monitor*, 24 8608-8620
- ten Hagen, R. (2013): Der richtige Zeitpunkt, um einzusteigen... Intraoralscan und klassische Abformung im Vergleich. In: *ZWR - Das deutsche Zahnärzteblatt*, 122 (9), 452-454

## Kontakt

PD Dr. rer. nat. habil. Christiane Kunert-Keil  
 Dr. rer. nat. Ines Zeidler-Rentzsch  
 Poliklinik für Kieferorthopädie der TU Dresden  
 Fetscherstr. 74  
 01307 Dresden  
<https://www.uniklinikum-dresden.de/de/das-klinikum/kliniken-polikliniken-institute/kfo>

Dr. med. Dominik Haim  
 Dr. med. dent. Bernhard Weiland  
 Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Günter Lauer  
 Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie der TU Dresden  
 Fetscherstr. 74  
 01307 Dresden  
[www.uniklinikum-dresden.de/mkg](http://www.uniklinikum-dresden.de/mkg)

Prof. Dr. Karol Kozak  
 Klinik für Neurologie  
 Fetscherstr. 74  
 01307 Dresden  
[www.uniklinikum-dresden.de/neu](http://www.uniklinikum-dresden.de/neu)

Dr. Olaf Müller  
 Carus Consilium Sachsen GmbH  
 Fetscherstr. 74  
 01307 Dresden  
[www.carusconsilium.de](http://www.carusconsilium.de)

Thomas Treichel  
 Computer konkret AG  
 Theodor-Körner-Str. 6  
 08223 Falkenstein  
[www.computer-konkret.de](http://www.computer-konkret.de)





# Automatische Vermessung der Knietopologie zur Unterstützung der Prothesenplanung für Kniearthroplastiken

Sebastian Heerwald und Marc Mörig

Durch ansteigende Alterserwartung werden Behandlungen für Erkrankungen des Bewegungsapparats immer relevanter. Gerade das Knie wird über die Zeit hinweg stark belastet und ist auch durchgehend in Benutzung. Durch Fehlstellungen, Brüche oder auch Arthrose kann es zum kompletten Verschleiß dieses Gelenks kommen. Da in einigen Fällen die konservativen Behandlungsmethoden versagen, wird ein Ersatz des Kniegelenks in Erwägung gezogen. Dieser Ersatz wird heutzutage durch Standardprothesen schon gut abgedeckt. Die Bewegungsfähigkeit kann wiederhergestellt und Schmerzen können reduziert werden.

Durch das weiterhin ansteigende Alter kommen immer mehr Revisionsendoprothesen zum Einsatz, da die Lebensdauer einer Knieendoprothese nur begrenzt ist. Um diese zu verlängern, kann man eine an den Bewegungsapparat individuell angepasste Prothese implantieren, die der Belastung besser gewachsen ist. Die Erstellung solcher individueller Prothesen ist Aufgabe des Forschungs- und Entwicklungsprojektes EXPErTEB (EXPErTEB 2018). Um solch eine angepasste Prothese herzustellen, benötigt dies jedoch konkrete Maße des Knies. Diese Arbeit soll ein Verfahren präsentieren, mit dem es möglich ist, anhand von CT-Aufnahmen des Kniegelenks alle nötigen geometrischen Maße zu bestimmen. Kern des Verfahrens ist ein angelearnertes Statistical Shape Model (SSM), dass nur die nötigen und zu erwartenden Verformungen des Modells zulässt, sodass es sich an das im Datensatz dargestellte Knie anpassen kann. Auf diesem Modell werden die Maße platziert. Ein Registrierungsalgorithmus verformt, verschiebt und dreht das Modell und die

auf der Oberfläche befestigten Maße folgen den Verformungen. Das resultierende angepasste 3D-Modell beinhaltet anschließend alle nötigen Maße des Patienten. Diese können letztendlich dafür benutzt werden, eine entsprechend individuelle Prothese zu parametrisieren.

Die Auswertung stellt über den Vergleich mit einer Groundtruth mithilfe von Dice und Abstandsvergleichen fest, welche Vermessungstypen verlässliche Maße liefern, die durch die Verformung rein topologisch nicht verändert werden. Hier stellte sich heraus, dass Maßmodelle basierend auf mehreren Messpunkten verlässlichere Quellen sind als einzelne Punkte. Das Verfahren an sich stellt durch die beliebige Platzierung von Maßen an dem Modell ein flexibles Werkzeug zur Vermessung dar, bei dem auch im Nachhinein beliebig neue Maße hinzugefügt werden können.

## **1 Vorgehensweise zur Vermessung mit Statistical Shape Models**

Der hier vorgestellte Lösungsansatz basiert auf der Anpassung eines angelernten Statistical Shape Modells auf den zu vermessenden Datensatz. Dabei werden Maße direkt am Statistical Shape Model platziert. Das Modell hat die Fähigkeit sich zu verformen und an den Knochen in einer CT-Aufnahme anzupassen. Dabei werden die starken Intensitätsgradienten, die der Knochen an den Rändern in CT-Aufnahmen aufweist, als Orientierung genutzt.

Nach der Verformung werden die am Statistical Shape Model platzierten Maße neu ausgewertet. Da sich die Orte an denen die Maße liegen verschoben und angepasst haben, passen sich auch die Maße an die neue Form an und die Vermessung ist möglich.

Auf diese Weise muss das Statistical Shape Model nur einmal die Form des Knies antrainiert werden. Danach können auf dem antrainierten Modell alle Maße beliebig platziert werden. Ein erneutes aufwändiges Anlernen Verformungsmodi des Statistical Shape Modells ist nicht nötig, um neue Maße einzuführen. Nach dem Anpassen des Modells auf einen neuen Datensatz, können neu platzierte Maße auch direkt an diesem Modell ausgewertet werden.

## **2 Training eines Statistical Shape Models**

Bevor eine Vermessung stattfinden kann, ist es nötig das Modellwissen im Statistical Shape Model anzulernen. Dazu wurden 19 Datensätze verwendet,

die verschiedene Ausprägungen der Knietopologie abbilden. Alle Knochenstrukturen des Knies wurden in diesen 19 Datensätze segmentiert. Die erstellten Segmentierungen gelten als Groundtruth für das Training und die späteren Tests.

Ein Statistical Shape Modell kann nun auf verschiedene Arten mit nötigen Korrespondenzen zwischen den einzelnen Datensätzen versorgt werden, so dass auf es Verformungen, die zwischen verschiedenen Knien typisch sind, trainiert wird. Einige dieser Ansätze fasst Heimann (Heimann, T., & Meinzer, H. P. 2009) zusammen. Daraus wurde ein Ansatz gewählt, der darauf basiert einen ausgewählten Hauptdatensatz auf alle anderen Datensätze nicht-rigide zu registrieren. Zuvor werden die Knochen mithilfe der Segmentierungsdaten maskiert, sodass nur noch die Knochen im Datensatz sichtbar sind. Anschließend werden die Knochen einzeln mithilfe der Demon-Registration registriert. Für den Hauptdatensatz entstehen dadurch Verformungsfelder für jeden Knochen, die für jeden Punkt angeben wo dieser in dem jeweiligen anderen Datensatz ist. Dadurch ist es wiederum möglich ein Mesh der Knochenstrukturen des Hauptdatensatzes in alle anderen Datensätze zu verformen. Die Annahme dabei ist, dass die resultierenden Meshes anschließend isomorph zueinander sind. Das ist nötig, da für das Training Modelle verwendet werden müssen, die aufeinander abgebildet werden können. Dies geht besonders gut, wenn diese die gleiche Graphenstruktur aufweisen und mit ihren Knotenpunkten die gleichen Orte auf der Knochenoberfläche aufweisen. Dabei unterscheidet sich die 3D-Position der einzelnen Punkte, jedoch nicht deren Interpretation als Ort an dem jeweiligen Knie.

Anschließend kann ein Statistical Shape Model angelernt werden. Dabei lernt es verschiedene mögliche Verformungsmodi, die nötig sind um alle Knie in der Trainingsmenge abbilden zu können. Im Zentrum steht ein Durchschnittsmodell aller angelernten Meshes. Auf Basis dieses Meshes wird für jeden Knotenpunkt für jeden Verformungsmodus ein Verformungsvektor gespeichert, der mit der angegebenen Stärke des Verformungsmodi skaliert wird. Die Verformungsmodi werden durch die statistische Analyse so gewählt, dass sie die stärksten Verformungen zwischen den Trainingsmeshes favorisieren, sodass eine Verallgemeinerung der Verformungen stattfindet.

Das Registrieren des SSMs erfolgt anschließend durch ein Standardverfahren namens ASM Search, wie es auch in Heimann (Heimann, T., & Meinzer, H. P.

2009) präsentiert wird. Dabei wird das Durchschnittsmodell des SSM über dem im CT-Datensatz abgebildeten Knie initialisiert. Anschließend wird eine rigide Registrierung durchgeführt, um das Modell vor der Verformung möglichst gut einzupassen. Der letzte Registrierungsschritt fügt die Verformungskomponente hinzu, sodass sich das Modell im Rahmen der Verformungsgrenzen des SSM möglichst optimal einpassen kann.

### 3 Vermessung durch ein Statistical Shape Model

Für die Individualisierung von Prothesen wurden innerhalb des EXPErTEB-Projekts Maße festgelegt. Eine Grundlage für die Auswahl war eine Studie von (Dong et. al. 2010) bei der ein Vermessungsmodell für Knie festgelegt wurde. Diese beinhalten hauptsächlich Abstandsmaße, die die Kondylen des Knies vermessen. Darauf aufbauend wurden weitere Maße, wie zum Beispiel Rollkurven, sogenannte J-Kurven, entlang der Kondylen mit aufgenommen, sowie Schnittebenen durch den Knochen.

Durch die bisherigen Standardprothesen wurden einige Mindestgenauigkeiten vorgegeben. Eine Anforderung der Standardprothesen ist, dass sie bei Implantation weniger als 2mm überstehen dürften, jedoch nicht unterstehen sollen, da dies sonst zu starken Schmerzen beim Patienten führen kann. Die zweite Größe ist die Staffelung des Knorpelersatzes, der zwischen die Metallimplante gesetzt wird. Diese werden in Abständen von 2mm Größen (z.B. von Mathys AG) zur Verfügung gestellt. Dadurch ist eine Genauigkeit von mindestens  $\pm 1\text{mm}$  oder kleiner nötig, um in einem Genauigkeitsbereich von 2mm zu bleiben. Insgesamt sollten die Maße also durch das Verfahren mindestens eine Genauigkeit von 1mm haben.

Wichtig war darüber hinaus, dass auch im Nachhinein neue Maße an das Modell angebracht werden können, da innerhalb des EXPErTEB-Projekts auch immer neue Maße nötig werden können. Da ein SSM nun ein Mesh ist, dass die Verformungen nur in einer angelernten Art und Weise zulässt, ist die Idee die Maße mit dem Modell mit zu verformen. Dazu werden Knotenpunkte auf dem Modell markiert, die anschließend als Landmarken zur Platzierung verschiedener Messmodelle fungieren. So ist es möglich Maße in angepasster Form neu zu berechnen, nachdem sich das SSM durch Registrierung an den Datensatz angepasst hat und darüber hinaus auch immer neue Maße zum SSM hinzuzufügen, ohne dass ein erneutes Training nötig ist.



Abbildung 1: Verwendeter Kniebereich für das Training des Statistical Shape Modells

Die entwickelten Maßmodelle können in folgende Arten unterteilt werden:

- Punkte, die direkt an einem Knotenpunkt des Modells befestigt werden,
- Abstände, die mithilfe von 2 Knotenpunkten definiert werden
- Ebenenschnitte, wobei mindestens drei oder auch mehr Punkte definiert werden, die sich mit dem Modell verformen und anhand denen eine Ebene mit kleinstem Abstand zu diesen Punkten berechnet wird. Anschließend kann das Modell mit dieser Ebene geschnitten werden, um Schnittkonturen zu erstellen,
- Pfade entlang des Modells, die sich an einer gegebenen Reihenfolge von Punkten entlang der Oberfläche bewegen und
- Paraboloiden, die in eine gegebene Menge von Punkten abstandsminimal gelegt werden und somit lokal die Hauptkrümmungen der Oberfläche bestimmen können.

Diese Messmodelle wurden letztendlich auf das SSM aufgebracht, um alle Maße abzudecken. Die Zusammenstellung der Maße ist in Abbildung 2 zu sehen.

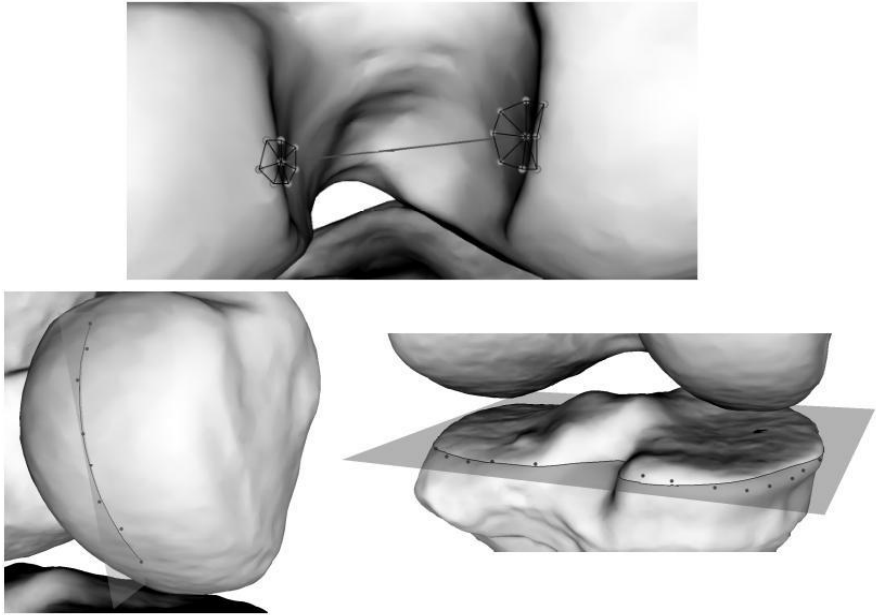


Abbildung 2: Befestigung eines Abstandsmaßes an 2 Knotenpunkten (oben), Platzierung einer Schnittebene anhand mehrerer markierter Knotenpunkte (unten links) und die Fixierung einer Oberflächenlinie durch mehrere Knotenpunkte entlang des SSMs (unten rechts).

#### 4 Auswertung der Vermessungsgenauigkeiten

Die Genauigkeit der Vermessung durch dieses Verfahren wurde durch Vergleich mit einer gegebenen Groundtruth erzeugt. Ein Problem des hier vorgestellten Vermessungsansatzes könnte es sein, dass sich das SSM bei der Verformung nicht nur in Normalenrichtung des Modells verformt, sondern auch in tangentialer Richtung. Die Auswertung soll zeigen, welche Fehler in tangentialer und normaler Richtung zu erwarten sind.

Im ersten Schritt der Auswertung soll gezeigt werden, ob sich das SSM überhaupt auf den gewünschten Bereich registriert. Dabei wird der Bereich innerhalb des registrierten SSMs als Segmentierung angesehen und es können somit die Groundtruth mit der Segmentierung durch den Algorithmus verglichen werden. Dabei wurde der Dice-Koeffizient zum Vergleich der Segmen-

tierungen verwendet. Nach Auswertung einer Leave-One-Out-Kreuzvalidierung mit jedem Datensatz wurde ein durchschnittlicher Dice über alle Daten von über 93% gemessen. Die Dicewerte aller Datensätze variieren dabei von 89% bis 97% Überlappung mit der Groundtruth.

Darüber hinaus wurde ein durchschnittlicher Abstand von Oberfläche des berechneten Modells zur Oberfläche der Groundtruth berechnet. Dabei wurde zum einen die Average Symmetric Surface Distance (AvgD) und die Root Mean Squared Distance (RMSD) verwendet. Der AvgD-Wert bewegte sich im Bereich  $1.26\text{mm} \pm 0.33$ , wohingegen der RMSD-Wert bei  $1.68\text{mm} \pm 0.46$  lag. (Liu, F.2018) beschäftigt sich ebenfalls mit der Segmentierung von Knien und es zeigte sich anhand dieser Maße, dass die bisher erreichten Werte vergleichbar gut mit schon einigen bestehenden Algorithmen sind, jedoch trotzdem noch verbessert werden kann, da die Segmentierung durch andere Algorithmen nochmals genauer ist und unter die 1mm-Marke sinken. Für die nachfolgende Vermessung kann im Vergleich zu den anderen aufgeführten Methoden jedoch nur diese verwendet werden, da die spezifischen Knotenpunkte des Meshes für die Vermessung mitverformt werden müssen.

Die grundlegende Segmentierung ist also zu anderen Segmentierungsalgorithmen vergleichbar gut und kann für die nachfolgende Vermessung genutzt werden. In der nachfolgenden Auswertung wurden nun Testprobanden gebeten eine textuell beschriebene Menge von Punkten auf Knochen in 3 Datensätzen zu markieren. Dadurch wurde eine Groundtruth bestimmt, die wiedergibt, wie die menschliche Wahrnehmung diese Punkte im Alltag platzieren würde. Darüber hinaus wurde auch verlangt bestimmte Linien und Schnittebenen in das Modell korrekt einzufügen. Anschließend wurde ein SSM mit eben jenen Maßen versehen und auf die gleichen Datensätze registriert. Die gegebenen Datensätze selbst wurden anhand ihres Abschneidens beim Dice-Koeffizienten gewählt, dabei wurde ein Datensatz aus dem Mittelfeld, der beste und ein Datensatz ausgewählt, der schlechter durch das SSM segmentiert wurden.

Das Ergebnis des Algorithmus wurde nun mit den Ergebnissen der Probanden verglichen. Der Vergleich bestand darin, zu erkennen, wie sehr sich eine Messung, die durch den Algorithmus bestimmt wurde, von den Messungen der Probanden unterscheidet. Dabei zeigte sich, dass einzelne Punkte eine eher starke Streuung aufwiesen und der Algorithmus sehr gute, aber auch

sehr schlecht passende Ergebnisse lieferte. Bei eingepassten Messmodellen, wie Schnittebenen, aber vor allem bei Pfaden auf der Modelloberfläche stellte sich heraus, dass diese wesentlich stabiler das Verhalten von menschlichen Probanden wieder spiegelten. Darüber hinaus wurde untersucht, welche Arten von Abweichungen vorliegen. Dazu wurde der Abstand zwischen den Messungen in einen tangentialen Teil und einen Teil, der in Richtung der Normalen des Modells liegt, aufgeteilt. Abbildung 3 zeigt die entstandenen Abweichungen abgetragen in tangentialen Anteil und Anteil in Normalenrichtung der Oberfläche.

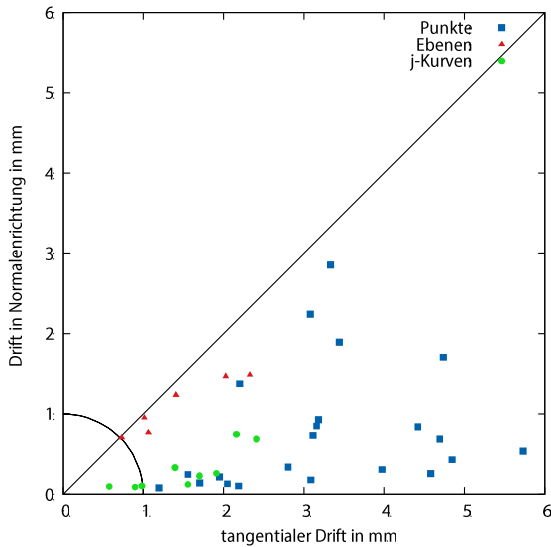


Abbildung 3: Abstände zwischen berechnetem SSM und der durchschnittlichen Maße, die durch die Probanden erzeugt wurden, gestaffelt nach Punkte, Schnittlinien und J-Kurven-Linien

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass der tangentiale Drift bei allen Maßen einen wesentlich höheren Fehleranteil ausmacht, als der Fehler in Richtung der Oberflächennormalen. Das bedeutet, dass das SSM-Modell nicht nur Verformungen in Richtungen seiner Normalen durchführt, sondern Modellpunkte auch entlang der Oberfläche driften. Dadurch ist darauf zu schließen, dass die Annahme, dass die Meshes während des Trainings isomorph sind, nicht strikt erfüllt war. An dieser Stelle muss also das Trainingsverfahren angepasst werden, sodass es die Trainingsmodelle so erstellt, dass sie wirklich isomorph werden. Dies kann zum Beispiel durch das Hinzufügen von



Landmarken in den zu registrierenden Datensätzen forciert werden, indem diese Landmarken zwangsweise durch das Verformungsfeld aufeinander abgebildet werden müssen.

In Normalenrichtung zeigt sich allerdings, dass die Genauigkeit der Linien durchgängig unter 1mm ist. Damit genügt die Vermessung durch Linien den Anforderungen für die Planung von individuellen Endoprothesen.

## Literaturverzeichnis

- Dong, L. M., Tian, X. Y., Wang, R., Li, X., Yang, Q., & Zhang, C. Q. 2010: The Establishment of 3D Human Knee Model and Geometry Dimension Database Based on CT. In *Information Engineering and Computer Science (ICIECS), 2010 2nd International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- EXPERTEB 2018: Webpresents des EXPERTEB-Projekts [https://agent3d.de/agent\\_experteb](https://agent3d.de/agent_experteb) 11.2.2019
- Heimann, T., & Meinzer, H. P. 2009: Statistical shape models for 3D medical image segmentation: a review. *Medical image analysis*, 13(4), 543-563.
- Liu, F., Zhou, Z., Jang, H., Samsonov, A., Zhao, G. & Kijowski, R. 2018: Deep convolutional neural network and 3D deformable approach for tissue segmentation in musculoskeletal magnetic resonance imaging *Magnetic resonance in medicine*, Wiley Online Library, , 79 , 2379-2391

## Kontakt

Sebastian Heerwald, M. Sc.  
Dornheim Medical Images GmbH  
Listemannstraße 10  
39104 Magdeburg  
[www.dornheim-medical-images.de](http://www.dornheim-medical-images.de)

Dr. Marc Mörig  
Dornheim Medical Images GmbH  
Listemannstraße 10  
39104 Magdeburg  
[www.dornheim-medical-images.de](http://www.dornheim-medical-images.de)



# Design und additive Fertigung von individualisierten biofunktionalen Implantaten in klinisch relevanten Dimensionen

David Kilian, Philipp Sembdner, Stefan Holtzhausen, Tilman Ahlfeld,  
Christine Schöne, Anja Lode, Ralph Stelzer und Michael Gelinsky

## 1 Einführung

### 1.1 Additive Fertigung in der Medizintechnik

Neue Technologien der additiven Fertigung läuten auch im Bereich der Medizin, Medizintechnik und der biomedizinischen Forschung eine neue Ära ein: Über verschiedene Fertigungsverfahren wie lithographische Techniken oder Laser-Sintering ist es bereits jetzt möglich, aus biokompatiblen Materialien entsprechend eines spezifischen Designs und ohne zusätzlich nötige Fertigungsmasken dreidimensionale Implantate in anatomischer oder patientenindividueller Geometrie herzustellen.

Großes Potential ergibt sich daraus beispielsweise für Lösungen zu orthopädischen Fragestellungen: Hierzu gehören u.a. die potentielle Korrektur von Fehlbildungen im mund-, kiefer- und gesichtschirurgischen Bereich, der Ersatz größerer Knochendefekte sowie der Ausgleich von kleineren Gelenkdefekten. Letztere beschreiben die Anwendung am Gelenkknorpel-Knochen-Übergang, um Eingriffen zur Implantation einer Totalendoprothese zu entgegen oder diese ggf. hinauszuzögern. Aus diesem Grund finden für entsprechende zukünftige, klinische Konzepte, sowie in den entsprechenden Forschungsbereichen unterschiedlichste Fertigungsmethoden Anwendung. Die additive Fertigung hat nicht nur das Design und die aufbauende Fabrikation von patientenindividuellen Titanimplantaten (Gander et al. 2015) durch Spritzgussverfahren revolutioniert, sondern auch den schnellen Aufbau von

Strukturen aus thermoplastischen Polymeren (Probst et al. 2010) und weichen Materialien durch extrusionsbasierte Techniken ermöglicht. Diese über Rapid Prototyping erhaltenen, individuellen Objekte können im Vergleich zu konventionellen Verfahren sehr schnell und ohne Materialausschuss auch in Kleinserien und Einzelanfertigungen individuell gefertigt werden.

Die essentielle Aufgabe für den klinischen Einsatz liegt hier in der Herstellung patientenindividueller Implantate. Allerdings sind die Technologien ebenso hinsichtlich spezifischer Gewebemodelle für forschungsrelevante Fragestellungen, die mittel- bis langfristig zu Erfolgen für die biomedizinische Patientenversorgung beitragen können, von großer Bedeutung.

Um hierbei eine Lücke zwischen den individualisierten, bezüglich ihrer äußeren Geometrie spezifisch designten Implantaten und einer intrinsischen Funktionalität zu schaffen, greift die biomedizinische Forschung auf die Kombination von Ansätzen aus dem Tissue Engineering (Langer & Vacanti, 1993) und den Vorteilen der additiven Fertigung sowie der damit verbundenen Konstruktion von anatomischen Geometrien zurück. Das Forschungsfeld und die Methoden der sog. Biofabrikation (Groll et al. 2016; Moroni et al. 2018) bringen die Vorteile und Konzepte dieser doch unterschiedlichen Wissenschaftsfelder zusammen, indem sie biologische Komponenten in den Fabrikationsprozess einbeziehen.

## 1.2 Biofabrikation

Im biomedizinischen Sinne sollten optimale Implantate und Ersatzstrukturen neben einer mechanischen Stabilität und Festigkeit auch eine biofunktionelle Aktivität aufweisen. Aus diesem Grund setzen die Konzepte der Biofabrikation auf die Integration von Zellen in den Fabrikationsprozess, die im weiteren Verlauf während einer Kultivierung *in vitro* und nach potentieller Implantation die Biomaterial- in natürliche Matrix umbauen und direkt die Aufgaben des Gewebes übernehmen können.

Die hierfür denkbaren additiven Fertigungsmethoden, die ein Überleben der zuvor in die zu verarbeitenden Materialien eingebrachten Zellen ermöglichen, sind der extrusionsbasierte 3D-Druck (3D-Plotten), bei dem Stränge aus pastösem Material abgelegt und daraus 3D-Konstrukte erstellt werden,

und der Inkjet-Druck, bei dem einzelne Tropfen gebildet und abgelegt werden, und – mit bisher deutlichen Abstrichen – laser-vermittelte Verfahren. Zur Herstellung von volumetrischen Strukturen in klinisch relevanten Dimensionen eignet sich allerdings primär das 3D-Plotten, bei dem durch die mittlerweile an vielen Instrumenten mögliche Mehrkanalextrusion verschiedene Materialien gemeinsam zu mehrphasigen Konstrukten verarbeitet werden können (Abbildung 1).

Dabei werden größtenteils auf natürlichen Biopolymeren basierende Hydrogele eingesetzt, also Netzwerke aus miteinander verbundenen Polymerketten mit einem enorm hohen Wassergehalt, wie er auch in nativen Geweben zu finden ist. Natürliche Materialien wie Alginat, Cellulose oder Agarose weisen eine hohe Verfügbarkeit auf Grund ihrer Gewinnungs-/Extraktionsmöglichkeiten aus Algen oder Mikroorganismen sowie eine hohe Biokompatibilität auf. Das Polysaccharid Alginat, welches biokompatibel über den Zusatz von Kalzium-Ionen zu einem Hydrogel vernetzt werden kann, ist in einer zellverträglichen Konzentration zu dünnflüssig für das 3D-Plotten. Aus diesem Grund kann eine weitere Komponente zur temporären Erhöhung der Viskosität und zum Einstellen der nötigen scherverdünnenden Eigenschaften herangezogen werden, wie am Beispiel einer Druckpaste aus 3% Alginat und 9% wasserlöslicher Methylcellulose (Alg/MC) gezeigt wurde (Schütz et al. 2017). Auch können in diese Pasten weitere Feststoffe wie das Nanosilikat Laponit, welches gleichermaßen die Viskosität sowie Scherverdünnung erhöhen und die Bindung von diversen bioaktiven Faktoren unterstützen kann, eingebracht werden (Ahlfeld et al. 2017), um volumetrische Konstrukte (Scaffolds) unterschiedlicher Geometrien zu erzeugen (siehe Abbildung 2).

Eine weitere Herausforderung stellt die schnelle und biokompatible Stabilisierung der extrudierten Stränge dar, da der Einfluss der Schwerkraft auf diese gerade in volumetrischen Dimensionen ( $> 1 \text{ cm}^3$ ) sowohl während als auch nach der Fabrikation eine kritische Größe darstellt. Zudem sollen die erzeugten Konstrukte über längere Zeit stabil und die darin enthaltenen Zellen am Leben bleiben. Hierzu können neben einer schonenden Ionen-vermittelten Netzbildung auch zusätzlich stabilisierende Materialstränge, z.B. aus thermoreversiblen Polymeren, die nach der Strangablage verfestigen, oder verschiedene technische Lösungen zur Anwendung kommen (zur

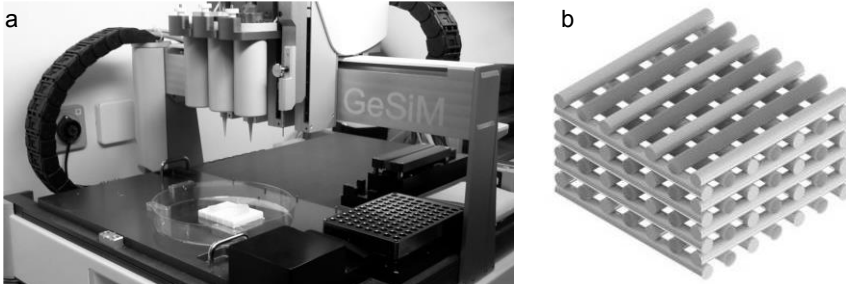


Abbildung 1: Mehrkanal-Drucker, BioScaffolder 3.1 (GeSiM mbH, Radeberg) (a). Schema eines zu einem Multimaterial-Scaffold verwobenen Netzwerks aus zellbeladenem Hydrogel (grau) und CPC-Strängen (weiß) (Kilian et al., 2017) (b)

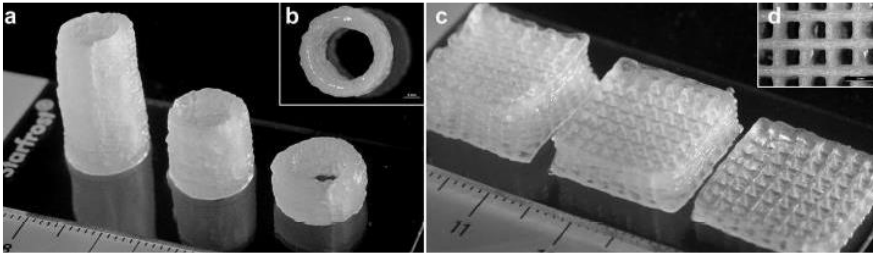


Abbildung 2: Verschiedene Geometrien mit offener Struktur 3D-geplotteter Alginat-basierter Hydrogele: Volumetrische Röhrenkörper mit variierender Höhe (a), Draufsicht auf Ringstruktur (b). Kubische Hydrogelscaffolds unterschiedlicher Schichtanzahl (10-30) mit 90°-Strangorientierung (c) und daraus resultierender offener innerer Geometrie (d) (Ahlfeld et al., 2017)

Übersicht: Kilian et al. 2017). Zur Versorgung der Zellen innerhalb der 3D-Strukturen mit Nährstoffen und Sauerstoff wird meist eine offene innere Architektur gewählt. Hierbei spielt die Formgenauigkeit sowohl bei der Extrusion einzelner Stränge, als auch der Fabrikation volumetrischer Modelle, eine große Rolle. Allerdings muss oft ein Kompromiss zwischen der Formgenauigkeit, welche mit höherem Polymergehalt und dadurch erhöhter Viskosität der Pasten steigt, und der Zellverträglichkeit gefunden werden. Zusätzlich wird die Reifung und Differenzierung der für Knochen-Knorpel-Anwendungen ins Gel eingebrachten zu differenzierenden mesenchymalen Stammzellen, oder aus humanem Gewebe isolierten Knorpelzellen (Chondrozyten) durch die Gabe von speziellen Faktoren (z.B. TGF- $\beta$ 3) unterstützt.

### 1.3 Individualisierte Implantate

Aus klinischen Daten der Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT) lassen sich geometrische Informationen gewinnen, die in den Prozess der Konstruktion einfließen und ein individuelles Design basierend auf der anatomischen Ursprungsstruktur, oder einem in Abstimmung mit klinischen KollegInnen erstellten Implantat/Gewebeersatz, ermöglichen.

Für den druckfähigen pastösen Kalziumphosphatzement (Lode et al. 2014) wurde dies kürzlich für die potentielle Anwendung am Modell eines Mittelhandknochens mittels open source Software aus vorliegenden CT-Daten realisiert (Ahlfeld et al. 2018b). Da viele Ansätze des optimierten Designs von Implantaten für die Konstruktion von Geometrien und Abläufen innerhalb der Pulverdruckverfahren bereits vorliegen (Sembdner 2016), ist nun das erklärte Ziel, diese Erkenntnisse auf den Extrusionsdruck und damit pastöse Materialien und den Aufbau aus einzelnen Strängen, damit auch auf das Feld der Biofabrikation übertragen werden.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Biofabrikation multiphasiger Gewebekonstrukte

Sowohl pure Gerüststrukturen für das Tissue Engineering (Scaffolds), zellbeladene Hydrogelkonstrukte als auch potentielle Implantatgeometrien wurden mit dem 3D-Plotter BioScaffolder 3.1 (GeSiM mbH, Radeberg), einem Mehrkanal-Extrusionsdrucker, realisiert. Multiphasige osteochondrale Konstrukte zur Nachbildung des Knochen-Gelenkknorpel-Überganges konnten durch die Kombination von zellbeladenem Hydrogel und einer mineralisierten Komponente realisiert werden:

Als Knochenstruktur-imitierende Substanz wurde ein pastöser, auf Tri-Kalziumphosphat basierender Kalziumphosphatzement (CPC) (INNOTERE GmbH, Radebeul) verarbeitet. Dieser wird im Zuge der Zementreaktion zu Hydroxylapatit, der mineralischen Hauptkomponente der nativen Knochenmatrix, umgesetzt.

Der Knorpelanteil des 3D-Konstruktes wurde im entwickelten Konzept mittels eines alginatbasierten, zellbeladenen Hydrogels umgesetzt. Primäre humane Chondrozyten wurden hierzu durch enzymatische Extraktion aus Gewebeproben von artikulärem Knorpel des Femurkopfes isoliert; für die Verwendung von Femurköpfen für die Zellisolation nach Operationen zur Implantation einer Hüft-Totalendoprothese liegt das Einverständnis der PatientInnen sowie die Zustimmung der Ethikkommission der Technischen Universität vor (EK303082014).  $5 \times 10^6$  Zellen wurden pro 1 g der Druckpaste aus Alginat und Methylcellulose (Alg/MC) (Schütz et al. 2017) eingerührt und verarbeitet. Für zellbiologische und biochemische Analysen wurden offenporige Strukturen aus vier Schichten (Innendurchmesser der Extrusionsnadel: 410  $\mu\text{m}$ ) geplottet (siehe Abbildung 3b). Mit den vorliegenden Materialien können allerdings auch problemlos volumetrische Konstrukte von mehr als 50 Ebenen erstellt werden. Nach Aushärtung der CPC-Phasen in gesättigter Luftfeuchte bei 37°C, wurden die Hydrogelstränge für 10 min mittels 100 mM  $\text{CaCl}_2$ -Lösung vernetzt. Zellbeladene Konstrukte wurden im Folgenden unter physiologischen Bedingungen (5%  $\text{CO}_2$ , 37°C) zum Zwecke der Differenzierung inkubiert.

### 2.3 Analyse biofunktioneller osteochondraler Konstrukte

Die zellbeladenen Konstrukte wurden zu verschiedenen Zeitpunkten der Kultur auf die Viabilität der Zellen hin untersucht. Dies geschah anhand einer sog. Lebend/tot-Markierung über die Detektion von entsprechenden Fluoreszenzfarbstoffen mittels konfokalem Laserscanningmikroskop (Leica TCS SP5), dabei wurden verschiedene Bereiche der Konstrukte analysiert. Eine Färbung mit MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazoliumbromid) wurde darüber hinaus zur Visualisierung von metabolisch aktiven Zellen innerhalb des Hydrogels angewandt.

Zudem wurden die Zellen auf ihr Proliferationsverhalten, ihre Morphologie und ihren Differenzierungsgrad auf biochemischer (u.a. Proteinexpression von knorpeltypischem Kollagen Typ 2) und molekularbiologischer Ebene hin analysiert. Diese Analysen wurden für Expansionsbedingungen als Kontrolle (ctrl; Zellkulturmedium mit proliferationsfördernden Serumproteinen aber



ohne Differenzierungsfaktor) und für spezifische chondrogene Differenzierungsbedingungen (diff; Zellkulturmedium ohne Serumproteine aber mit chondrogenem Differenzierungsfaktor TGF- $\beta$ 3) durchgeführt.

## 2.4 Konstruktion und Fabrikation individueller Geometrien

Mittels unterschiedlicher kommerzieller und nicht-kommerzieller Softwarelösungen wurden der Transfer aus klinischen Daten und die Aufbereitung dieser für den extrusionsbasierten 3D-Druck vorangetrieben. Als Struktur für eine *proof-of-concept* Anwendung wurde die Geometrie eines menschlichen Meniskus gewählt. Aus einem CT-Datensatz eines menschlichen Kniegelenks der linken Seite wurden geometrische Daten des entsprechenden Innenmeniskus mittels Dornheim Segmenter Analyzer® 2016 extrahiert. Auf Grund der gegebenen Auflösung des CT-Datensatzes (Schichtbildabstand ca. 1 mm), der Größe eines Meniskus (ca. 40x40x10 mm) sowie der schlechten Differenzierbarkeit zum restlichen Knochengewebe infolge ähnlicher Dichteigenschaften, erfolgte die Auswahl und Markierung des Bereiches in den Bilddaten manuell in der Software in Abhängigkeit eines eingestellten Grauschwellwertes. Die markierte Region wurde anschließend als 3D-STL-Modell exportiert und in der Software Geomagic Studio® 2012 aufbereitet. Dies beinhaltete u.a. das Schließen von Löchern oder das Glätten des Modells. Die daraus resultierenden stl-Daten wurden via SOLIDWORKS® mit einer unterstützenden Struktur zur Stabilisierung der 3D-Überhänge komplettiert, und anschließend mittels Microsoft 3D Builder in ein 3mf Dateiformat überführt. Das finale Strangdesign wurde innerhalb der Gerätesoftware (GeSiM) erstellt. Am Ende wurde ein Multimaterialkonstrukt aus einem Alg/MC-Hydrogel in anatomisch korrekter äußerer Form des Innenmeniskus, sowie aus CPC als unterstützender Struktur darunter, hergestellt.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Fabrikation multiphasiger Hydrogel-CPC-Strukturen

Einfache Gerüststrukturen (Scaffolds) und potentielle Implantatgeometrien wurden durch den Aufbau aus extrudierten Hydrogel- und CPC-Strängen generiert. Auch der anvisierte Übergang von Knochengewebe zur überziehen-

den Knorpelschicht für osteochondrale Gewebeäquivalente konnte erfolgreich realisiert werden – zu diesem Zweck wurde ein multiphasiges Konzept zur Fusion einer potentiell zellbeladenen Alg/MC-basierten Knorpelschicht mit den subchondralen Knochen nachbildenden Schichten aus CPC erarbeitet (Abbildung 3) (Ahlfeld et al. 2018).

Eine große Herausforderung des Prozesses der kombinierten Verarbeitung von Pasten besteht in der simultanen Vernetzung und Stabilisierung der Phasen. Die Methode sollte sowohl für die immobilisierten Zellen verträglich, als auch für die Stabilität der Materialien effektiv sein. Da diese auf Seiten des Alginats auf ionischen Wechselwirkungen mit Kalzium-Ionen, die durch Inkubation in einer entsprechenden Lösung eingebracht werden, und für CPC auf einem Aushärtvorgang in Wasser oder Luftfeuchte basieren, galt es, die beiden Konzepte aufeinander abzustimmen. Dies konnte am effektivsten durch ein kurzzeitiges Verweilen in Luftfeuchte und nachfolgende ionische Vernetzung in  $\text{CaCl}_2$ -Lösung und Inkubation in Zellkulturmedium gelöst werden (Ahlfeld et al. 2018). Die Inkubation in Luftfeuchte verhindert die Bildung von Mikrorissen, die die mechanische Stabilität des CPC reduzieren (Akkineni et al. 2015, Ahlfeld et al. 2017).

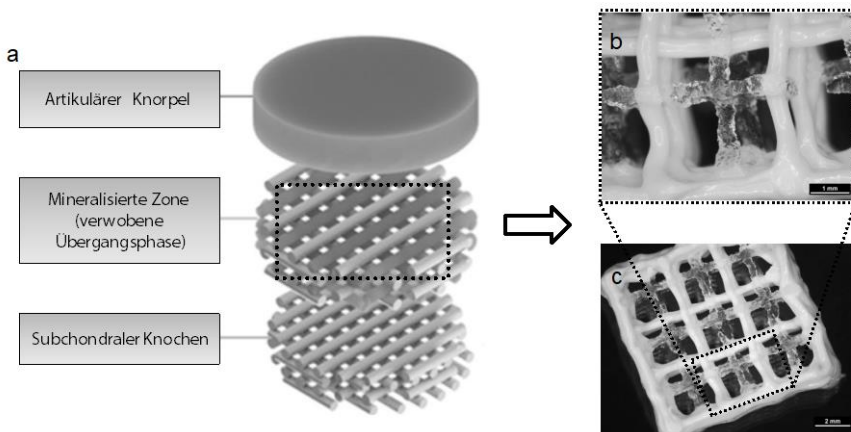


Abbildung 3: A: Konzept zur Nachbildung der Grenzschicht zwischen Röhrenknochen und artikulärem Knorpel (Gelenkknorpel), wie man sie in ähnlicher Weise in menschlichen Gelenkoberflächen findet (Ahlfeld et al., 2018) (a) Fusion von Strängen innerhalb eines multiphasigen Konstruktes aus Alg/MC-Hydrogel und CPC, welches die mineralisierte Knorpelschicht imitiert, mit gezielten Makroporen zur Versorgung der im Hydrogel eingebrachten Zellen mit Sauerstoff und Nährstoffen hergestellt

(b: Maßstabsbalken 1 mm; c: 2 mm)

### 3.2 Biofunktionalität – Viabilität und Morphologie immobilisierter Zellen

Die Viabilität eingebrachter Zellen konnte innerhalb sowohl mono- als auch biphasiger Konstrukte über mehrere Wochen während des Differenzierungsvorganges und der damit verbundenen Ausbildung einer eigenen extrazellulären Matrix sichergestellt werden. Der Großteil der Zellen überlebte den Fabrikationsvorgang und die Inkubation im Hydrogel, wobei ein leichter initialer Abfall der lokalen Zellviabilität an den Hydrogel-CPC-Kreuzungspunkten in Folge der Zementierungsreaktion des CPC zu beobachten war (Ahlfeld et al., 2018).

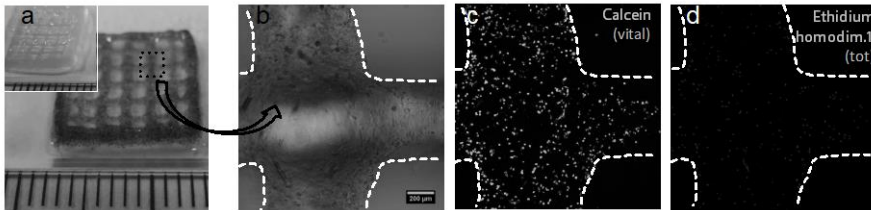
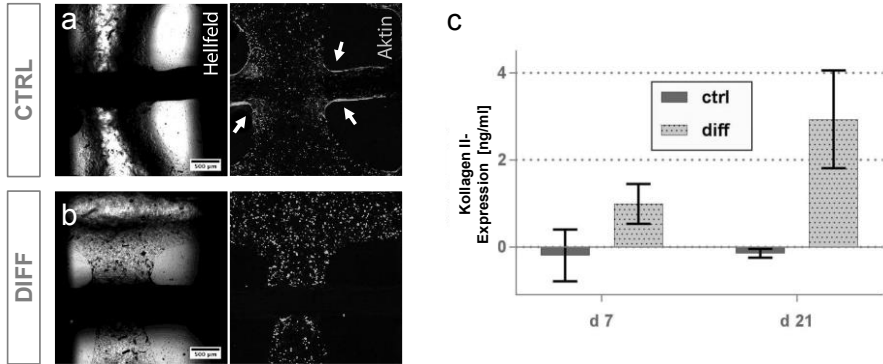


Abbildung 4: MTT-Färbung eines monophasigen zellbeladenen Scaffolds zur Analyse der metabolischen Aktivität eingebrachter Chondrozyten im Vergleich zu einem zellfreien Scaffold (a). Lebend-Tot-Färbung der eingebrachten Zellen nach Ablauf des Fabrikationsvorganges und initialer Inkubation unter Zellkulturbedingungen (Tag 1): Hellfeldbild der Strangkreuzung, Maßstabsbalken: 200 µm (b). Calcein-Färbung der lebenden Zellen an Tag 1 (c). Tote Zellen zum identischen Zeitpunkt im identischen Scaffoldausschnitt, markiert durch Ethidium Homodimer 1 (d)

Differenzierte und undifferenzierte Zellen wurden nach 21 Tagen, der für die chondrogene Differenzierung üblichen Zeit, hinsichtlich ihrer Morphologie und des Differenzierungszustandes analysiert. Eine Fluoreszenzfärbung der Aktin-Filamente des Zytoskeletts der Chondrozyten zeigte, dass nur diejenigen Zellen innerhalb der Knorpel-imitierenden Hydrogelmatrix verblieben, welche unter Differenzierungsbedingungen kultiviert worden waren. Undifferenzierte Zellen zeigten die Tendenz, das Gel zu verlassen und auf das steifere Material des CPC überzuwandern, um dort auf der Oberfläche zu adhären und zu proliferieren (Abbildung 2 a, b). Der Reifungsgrad der Chondrozyten unter Differenzierungsbedingungen konnte über die Detektion des für Knorpelgewebe charakteristischen Proteins Kollagen II nachgewiesen werden (Abbildung 2 c).



### 3.3 Individuelles Design aus DICOM Daten

Aus klinischen CT-Daten konnte aus den in der Studie verwendeten Materialien ein Modell eines menschlichen Innenmeniskus aus Alg/MC-Hydrogel erzeugt und anschließend mit hoher Formgenauigkeit gedruckt werden. Als stabilisierendes Material der zentralen Meniskusstruktur wurde hierbei CPC als offenporiges Gerüst verwendet, während das Design des Hydrogels der nativen Meniskusgeometrie ohne Makroporen nachempfunden wurde. In Abbildung 6 sind die (wesentlichen) Schritte der Aufbereitung und Umsetzung des Designs und der Fabrikation der Strukturen dargestellt.

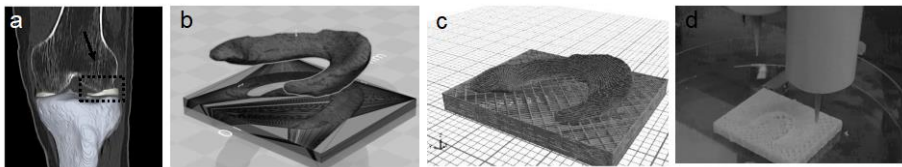


Abbildung 6: Realisierung eines Modells einer Außenmeniskus-Struktur nach Datentransfer und -aufbereitung aus humanen klinischen CT-Aufnahmen des Kniegelenkes (a), mit Teilen des Tibia- und Femurknochens. Transfer und Virtualisierung der Strukturumgebung in einer digitalen Umgebung (Microsoft Builder, b) und Umsetzung der Konstruktion in der entsprechenden Instrumentensoftwareumgebung (GeSiM), aufgebaut aus Einzelsträngen von Hydrogel und CPC als Support-Material (c). Herstellung mittels Multikanalextrusion (d).

## 4 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Studie demonstriert das Potential des Zusammenwirkens von Konstruktionstechnik und Biomedizin im Hinblick auf die Herstellung von biofunktionalen Modellen und Implantaten mit vitalen menschlichen Zellen, die bei Bedarf über hydrogelvermittelte Applikation in den Fabrikationsprozess eingebunden werden können.

Nach einzelnen Geweben und (aus technischen Gründen) zugehörigem Support-Material sollen zukünftig auch heterogene Gewebetypen aus klinischen Bilddaten konstruiert und nachgebildet werden. Hierzu zählt primär die osteochondrale Übergangsschicht zwischen Knochen und Gelenkknorpel. Um dieses Ziel zu erreichen, sind weitere Konstruktionslösungen sowie Materialentwicklungen notwendig.

Um die Biofabrikation-assoziierten Ansätze weiter auszubauen, sollen zu den bisherigen einzelnen Kulturen von humanen Chondrozyten im Gel und innerhalb des multiphasigen Konstruktes, weitere Zelltypen hinzugefügt werden. Dies kann durch die Verwendung von mesenchymalen Stammzellen erfolgen, die durch mechanische oder biochemische Stimulation dann in Knochenzellen (osteogen) differenzieren sollen. Dies wäre ein weiterer Schritt in Richtung der Ko-Kultivierung verschiedener Gewebezelltypen und im speziellen der Biofunktionalität eines osteochondralen 3D-Modells. Über die Extrusion von koaxialen Kern-Mantel-Strängen, in denen verschiedene Zelltypen oder Differenzierungsfaktoren mit definierter räumlicher Auflösung appliziert werden können, könnte diese lokale Differenzierung von Stammzellen oder unterschiedlichen vordifferenzierten Zelltypen gelingen.

Ein großes Augenmerk innerhalb des Feldes liegt hierbei auch auf der Charakterisierung und Optimierung der makroporösen Struktur. Zum einen spielt deren Einfluss auf mechanische Eigenschaften hinsichtlich Kompressions- und Scherverhalten eine große Rolle, zum anderen dient diese offene Porenstruktur und deren spezifische Geometrie der Aufrechterhaltung physiologischer Bedingungen der Zellen bezüglich der Nährstoffversorgung und des Sauerstofflevels innerhalb der dreidimensionalen Konstrukte.

Die Betrachtung all dieser interdisziplinären Aspekte soll ermöglichen, vorliegende Entwicklungen weiter voranzutreiben und den Herausforderungen

auf dem Weg zu mittels Biofabrikation erstellten individuellen Ersatzgeweben und spezifischen 3D-Modellen zu begegnen.

## Danksagung

Die AutorInnen danken dem Europäischen Sozialfonds (ESF) und dem Freistaat Sachsen für die finanzielle Unterstützung des interdisziplinären und kooperativen Projektes im Rahmen der institutsübergreifenden Nachwuchsfor-schergruppe *IndivImp* an der TU Dresden.

## Literaturverzeichnis

- Gander, T, Essig, H, Metzler, P, Lindhorst, D, Dubois, L, Rücker, M & Schumann, P (2015), Patient specific implants (PSI) in reconstruction of orbital floor and wall fractures, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 43 (1), 126-130
- Probst, FA, Hutmacher DW, Müller DF, Machens, HG, Schantz, JT (2010), *Handchirurgie - Mikrochirurgie - Plastische Chirurgie*, 42 (6), 369-373
- Langer, R & Vacanti, JP (1993), *Tissue engineering*, *Science*, 260 (5110), 920-926
- Groll, J, Boland, T, Blunk, T, Burdick, JA, Cho DW, Dalton, PD, Derby, B, Forgacs, G, Li, Q, Mironov, VA, Moroni, L, Nakamura, M, Shu, W, Takeuchi, S, Vozzi, G, Woodfield, TB, Xu, T, Yoo, JJ, Malda, J (2016), Biofabrication: reappraising the definition of an evolving field, *Biofabrication*, 8 (1)
- Moroni, L, Boland, T, Burdick, JA, Da Maria, C, Derby, B, Forgacs, G, Groll, J, Li, Q, Malda, J, Mironov, VA, Mota, C, Nakamura, M, Shu, W, Takeuchi, S, Woodfield, TBF, Xu, T, Yoo, JJ, Vozzi, G (2018), *Biofabrication: A Guide to Technology and Terminology*, 36 (4)
- Kilian, D, Ahlfeld, T, Akkineni AR, Lode A, Gelinsky M (2017), Three-dimensional bioprinting of volumetric tissues and organs, *MRS Bulletin*, 42 (8), 585-592
- Schütz, K, Placht, AM, Paul, B, Brüggemeier, S, Gelinsky, M, Lode, A (2017), Three-dimensional plotting of a cell-laden alginate/methylcellulose blend: towards biofabrication of tissue engineering constructs with clinically relevant dimensions, *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 11 (5), 1574-1587
- Ahlfeld, T, Cidonio, G, Kilian, D, Duin, S, Akkineni, AR, Dawson, JI, Yang, S, Lode, A, Oreffo, ROC, Gelinsky, M (2017), Development of a clay based bioink for 3D cell printing for skeletal application, *Biofabrication*, 9 (3)
- Lode, A, Meissner, K, Luo, Y, Sonntag, F, Glorius, S, Nies, B, Vater, C, Despang, F, Hanke, T, Gelinsky, M (2014), *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 8 (9), 682-693

- Ahlfeld, T, Köhler, T, Czichy, C, Lode, A, Gelinsky, M (2018), A Methylcellulose Hydrogel as Support for 3D Plotting of Complex Shaped Calcium Phosphate Scaffolds, *Gels*, 4 (3)
- Semdbdner P (2016), Rechnergestützte Planung und Rekonstruktion für individuelle Langzeit-Knochenimplantate am Beispiel des Unterkiefers, Dissertation, Technische Universität
- Ahlfeld, T, Doberenz, F, Kilian, D, Vater, C, Korn, P, Lauer, G, Lode, A, Gelinsky, M (2018), Bioprinting of mineralized constructs utilizing multichannel plotting of a self-setting calcium phosphate cement and a cell-laden bioink, *Biofabrication*, 10 (4)
- Akkineni, AR, Luo, Y, Schumacher, M, Nies, B, Lode, A, Gelinsky, M (2015), 3D plotting of growth factor loaded calcium phosphate cement scaffolds, *Acta Biomaterialia*, 27, 264-274
- Ahlfeld, T, Akkineni, AR, Förster, Y, Köhler, T, Knaack, S, Gelinsky, M, Lode, A (2017), Design and Fabrication of Complex Scaffolds for Bone Defect Healing: Combined 3D Plotting of a Calcium Phosphate Cement and a Growth Factor-Loaded Hydrogel, *Annals of Biomedical Engineering*, 45 (1), 224-236

## Kontakt

David Kilian (MSc), Dipl.-Ing. Tilman Ahlfeld, Dr. Anja Lode, Prof. Dr. Michael Gelinsky  
 Zentrum für Translationale Knochen-, Gelenk- und Weichgewebeforschung  
 Universitätsklinikum und Medizinische Fakultät *Carl Gustav Carus*  
 Technische Universität Dresden  
[david.kilian@tu-dresden.de](mailto:david.kilian@tu-dresden.de)  
[www.biofabrikation.de](http://www.biofabrikation.de)

Dr. Philipp Semdbdner, Dr. Stefan Holtzhausen, Dr. Christine Schöne, Prof.  
 Dr. Ralph Stelzer  
 Professur für Konstruktionstechnik/CAD  
 Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion  
 Technische Universität Dresden  
[philipp.semdbdner@tu-dresden.de](mailto:philipp.semdbdner@tu-dresden.de)





# Design von Medizinprodukten – Einfluss regulatorischer Anforderungen auf den Designprozess

Christian Thomas

## Produktdesign als wesentlicher Teil des Entwicklungsprozesses von Medizinprodukten

Neben den bekannten Herausforderungen an die Designqualität von Investitionsgütern (Kosten, Herstellbarkeit, Langlebigkeit, etc.) unterliegt das Design von Medizinprodukten zusätzlichen Anforderungen. So stellt die enge Verzahnung aus Funktionalitäten und Design eine große Herausforderung dar. Weiterhin müssen die teilweise konträren Anforderungen von Anwendern und Patienten in einem Gerät berücksichtigt werden. Gegenüber anderen Investitionsgütern liegt der wesentliche Unterschied im potentiellen Risiko einer fehlerhaften Behandlung mit der Folge von gesundheitlichen Problemen für den Patienten und hohen Regressansprüchen gegen das Unternehmen. Auch wenn die **geschätzte** Anzahl von über 250.000 Todesfällen, verursacht durch Behandlungsfehler, im Jahr 2013 in US Krankenhäusern (Makary et al. 2016) angezweifelt werden darf, ist ein statistisch noch nicht erfasster Zusammenhang zwischen Behandlungsfehlern und verwendeten Medizinprodukten zu vermuten. Von 2690 **bestätigten** Behandlungsfehlern in Deutschland im Jahr 2017 sind zwar nur 0.8% auf fehlerhafte Medizinprodukte zurückzuführen (MDK Bayern 2018). Jedoch wurde der Anteil der fehlerhaft angewendeten Medizinprodukte nicht erhoben. Weiterhin ist von einer hohen Anzahl von Patienten nicht erkannter bzw. nicht gemeldeter Vorfälle auszugehen. Zur Minimierung des Risikos wurden spezifische Normen und Richtlinien geschaffen, deren frühzeitige Einbindung sich sowohl

auf den Designprozess als auch auf das Designergebnis selbst auswirkt. Bereits in der Konzeptphase sollten die wesentlichen Anforderungen gesammelt werden und als Rahmen für die Usability und das Produktdesign kommuniziert werden. Widersprüchliche Anforderungen (z.B. geringes Gewicht vs. Stabilität) sollten mit Hinblick auf ein gutes Gesamtergebnis im agilen Projektteam diskutiert und entschieden werden. Auch wenn der Designprozess dadurch komplexer wird, ist in der Praxis oftmals eine kürzere Gesamtentwicklungsdauer feststellbar. Die frühzeitige Einbeziehung des Designs sichert den notwendigen gestalterischen Spielraum und verhindert, dass das Design als letzter Schritt innerhalb einer Entwicklungskette, also als Produktkosmetik praktiziert wird. Die Ergebnisse dieser integralen Designentwicklung sind oftmals fundierter und führen zu einer höheren Produktqualität, da die immer wichtiger werdenden Bedürfnisse der Anwender von Anfang mit einbezogen wurden. Nicht zuletzt, kann dadurch auch ein höherer Verkaufspreis erzielt werden.

### **Design als Wettbewerbsfaktor**

Im internationalen Markt wettbewerbsfähige Medizinprodukte verfügen nicht nur über ein hohes Maß an Funktionalität und Sicherheit, sondern sind darüber hinaus auch fehlerfrei, effizient und intuitiv zu bedienen. Über die eigentliche Zweckbestimmung hinaus macht die Nutzung dieser Produkte Spaß und vertieft so die Bindung zwischen Anwender und Produkt. Mit dem Ziel einer vollumfassenden positiven User Experience übernimmt das Produktdesign eine zentrale Rolle während der Entwicklung. Es prägt sowohl die Wahrnehmung der Marke des Herstellers als auch die Wahrnehmung des eigentlichen Produktes vor und während der Benutzung. Über das Design werden auch die Produkteigenschaften kommuniziert und Alleinstellungsmerkmale durch eine charakteristische Formgebung geschaffen. Vor dem Hintergrund des wachsenden Homecare Bereiches und des POCT (Point-of-Care Testing) rücken aber auch die Patienten selbst in den Fokus der Produktentwickler. Erfolgreiche Medizinprodukte begeistern über ein wertiges und zeitgemäßes Produktdesign Anwender und Patienten gleichermaßen. Damit kann ein auf die Bedürfnisse des Patienten ausgerichtetes Produktdesign die Compliance erhöhen und somit die Diagnostik bzw. Behandlung positiv beeinflussen.



Abbildung 1: Bedieneinheit für elektrische Rollstühle. Ergebnis des nutzerzentrierten Designs.

## Usability und Produktdesign

Die Entwicklung eines Medizinproduktes beginnt üblicherweise mit der Formulierung der medizinischen Zweckbestimmung zur Diagnostik oder zur Behandlung von Krankheiten. Ausgehend vom bestimmungsgemäßen Gebrauch werden die potentiellen Risiken bei der Nutzung des Medizinproduktes erfasst und bewertet. Dazu werden wahrscheinliche Anwendungsszenarien unter Festlegung von Anwender- und Patientengruppen entwickelt. Bereits in dieser frühen Phase ist die Einbeziehung von Usability Experten gefordert um die Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 62366 zu entwickeln und zu dokumentieren. Die Usability Konzepte werden entwicklungsbegleitend (formativ) weiterentwickelt und nach Bedarf anhand von Tests durch Usability Engineers evaluiert (siehe Abbildung 2). Die abschließende summative Bewertung der Gebrauchstauglichkeit ist anhand von Prototypen vorzunehmen.

Die Entwicklung eines effektiven und effizienten Bedienablaufs hat große Auswirkung auf die Typen der Nutzerschnittstellen und bestimmt bei vielen Produkten die Grundausrichtung bzw. Gerätearchitektur und somit auch das Produktdesign. Daher kann Produktdesign nicht losgelöst von der Usability betrachtet werden. Das Design kommuniziert vielmehr eine korrekte Handhabung und Bedienung indem es z.B. die Haltung eines Handgerätes durch ein eindeutiges Griffdesign vorgibt.



Abbildung 2: Interne Validierung erster Usability Konzepte einer Bedieneinheit für elektrische Rollstühle unter Berücksichtigung relevanter Fehlstellungen und Einschränkungen.

Neben der Konzeption von Bedienabläufen, der Ergonomie und dem Design von Hardware Nutzerschnittstellen, nimmt die Konzeption der GUI (Graphical User Interface) einen immer größeren Stellenwert ein. Die Konzeption dieser oftmals zentrale Nutzerschnittstelle (z.B. in Form eines Touchscreens) unterliegt auch den Anforderungen einer optimalen Gebrauchstauglichkeit.

## Einfluss regulatorischer Anforderungen auf das Design von Medizinprodukten

Alle Medizinprodukte unterliegen dem ab Mai 2017 gültigen europaweit einheitlichen Rechtsrahmen der Medical Device Regulation (Regulation (EU) 2017/745) welche mit einer Übergangszeit bis 2020 die bisherigen nationalen Richtlinien und Gesetze ablöst. Die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen garantiert einen hohen Grad an Gesundheitsschutz, Leistungsfähigkeit und Sicherheit für Patienten, Anwender und Dritte. Für den Verkauf von Medizinprodukten ist in Europa die CE-Kennzeichnung vorgeschrieben. Mit der CE-Kennzeichnung dokumentiert der Hersteller oder Importeur die lückenlose Konformität mit den gesetzlichen Bestimmungen. Abhängig von der jeweiligen Risikoeinstufung des Medizinproduktes (ab Klasse 2a) muss eine Benannte Stelle eingeschaltet werden, deren Kennnummer der CE-Kennzeichnung beigelegt ist. Die Erfüllung aller Anforderungen wird in einem Konformitätsbewertungsverfahren nachgewiesen, das für Medizinprodukte über die gesamte Lebensdauer die Klärung folgender Sachverhalte nach sich zieht:

## Sicherheit

- Risiken und Nebenwirkungen analysieren, bewerten und minimieren
- Biologische Verträglichkeit sicherstellen, Infektionsrisiken reduzieren oder ausschalten
- Mechanische, elektrische und elektromagnetische Sicherheit gewährleisten
- Produktkombinationen erlauben oder untersagen
- Sicherheits- und Gebrauchsanweisung auf Vollständigkeit und Verständlichkeit prüfen.

## Leistungsfähigkeit und Nutzen

- Medizinprodukte klinisch oder diagnostisch bewerten
- Ausgelobte Produkteigenschaften und Spezifikationen einhalten
- Therapeutischen oder diagnostischen Nutzen sicherstellen
- Messsicherheit gewährleisten

## Überwachung

- des Herstellers
- des Medizinproduktes

Das Produktdesign für CE konforme Medizinprodukte wird maßgeblich durch die Norm DIN EN 60601-1 und ihre Partikulär Standards mit konkreten Vorgaben zur Prüfung der mechanischen und elektrischen Sicherheit beeinflusst. Das Inverkehrbringen von Medizinprodukten setzt je nach Medizinproduktklasse eine umfangreiche Prüfung der Produkte anhand von serienäquivalenten Systemen voraus. Die mechanische Sicherheit von Tragsystemen (z.B. Stativlösungen) wird durch das Aufbringen einer Prüflast getestet, die mit materialabhängigen Sicherheitsfaktoren beaufschlagt wird. Je nach Bruchdehnung und Risikoabschätzung werden Sicherheitsfaktoren zwischen 2,5 und 12 angewendet. Eine plastische Verformung der getesteten Teile ist zulässig, solange daraus keine Risiken für den Patienten oder Anwender resultieren. Der fehlerfreie und sichere Betrieb mit defekten Teilen muss weiterhin möglich sein oder aber der Anwender erkennt den Fehler und kann den Fehler beheben (lassen). Für die Dimensionierung und damit auch für das Design ist die Kenntnis solcher Anforderungen von großer Bedeutung.



Abbildung 3: Die Dimensionen eines Geräteträgers sind abhängig vom verwendeten Serienmaterial und dem Fertigungsverfahren (hier bewusst gezogenes Aluminium ohne Schweißverbindungen)

Für transportable Medizinprodukte gelten konkrete Anforderungen für die Kippstabilität. In einem Test darf das Gerät auf einer 10° geneigten Ebene nicht kippen oder rutschen. Weiterhin werden seitliche Bedienkräfte von max. 150N in einer Höhe von max. 150cm auf das Gerät simuliert woraus auch kein Risiko des Kippens entstehen darf. Während des Designprozesses muss ein Kompromiss aus Größe des Gerätefußes und der Gewichtsverteilung gefunden werden. Aus der Norm ergibt sich, dass der projizierte Schwerpunkt in allen Gerätezuständen stets einen Abstand  $>225\text{mm}$  von der virtuellen Kippachse haben muss, weshalb auch die Anzahl und Position der Rollen bzw. Füße und damit das Design eine wesentliche Rolle spielt (siehe Abbildung 4). Einen wesentlichen Einfluss auf Rollengröße und Bodenfreiheit hat der genormte Schwellentest, indem nachgewiesen werden muss, dass das Gerät gefahrlos eine 20mm hohe Schwelle überwinden kann.

Der Nachweis einer konkreten IP Schutzklasse ist für CE-konforme Medizinprodukte vorgeschrieben. In Abhängigkeit von der angestrebten IP Schutzklasse können aufwendig abgedichtete Gehäuse und eventuell notwendige äußere Schnittstellen den Entwicklungsaufwand deutlich vergrößern. Daher muss bereits in der Konzeptphase die IP Klasse definiert werden, die unbe-

dingt notwendig ist um einen bestimmungsgemäßen Gebrauch zu gewährleisten. Auch wenn aufgrund des Arbeitsumfeldes die IP Klasse X2 i.d.R. ausreichend ist, wird aufgrund notwendiger Desinfektionsmaßnahmen die Klasse X4 oder höher angestrebt. Die sich daraus ergebenden Maßnahmen zum Erreichen der Klasse sind relevant für das Gehäusedesign. Der in den IP Schutzklassen vorgeschriebene Berührungsschutz gegenüber spannungsführenden Teilen im Inneren des Gerätes muss ebenfalls durch konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden.

Die aus den mechanischen Tests resultierenden Beschädigungen am Gehäuse dürfen keine elektrischen Risiken hervorrufen. Insbesondere dürfen vorgegebene Luft- und Kriechstrecken nicht unterschritten und spannungsführende Teile offengelegt werden. Zur Erreichung der elektromagnetischen Störfestigkeit bzw. Verträglichkeit kann es erforderlich sein, dass das Gehäuse EMV-dicht ausgeführt werden muss. Metallische Gehäuseteile elektrischer Medizinprodukte müssen zudem geerdet werden – dies trifft auch auf bewegliche Teile zu.

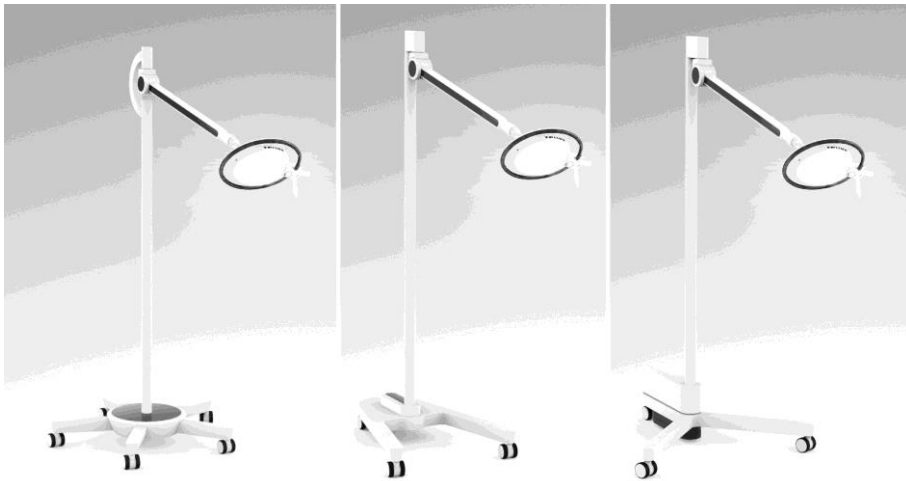


Abbildung 4: Die Form eines Gerätefußes unterliegt regulatorischen Randbedingungen. Ein möglichst kleiner Fuß ist so ausgelegt, dass sich der Schwerpunkt mittig zwischen den Rollen bewegt.



Abbildung 5: Oberflächen mit Kontakt zu Patienten müssen biokompatibel sein.

Zur Vermeidung von Unverträglichkeiten sind alle Teile mit direktem Hautkontakt biokompatibel zu gestalten. Notwendige Maßnahmen zur Desinfektion oder Sterilisation von Oberflächen haben direkte Auswirkungen auf die Auswahl von Materialien oder Oberflächenbeschichtungen.

Wenn das zu entwickelnde Produkt erstattungsfähig sein soll, ergeben sich durch die Bedienung verschiedener Märkte weitere Anforderungen. Eine detaillierte Auflistung der geforderten Produktmerkmale und Funktionen für die einzelnen Zielmärkte ist für eine frühzeitige Implementierung des Designs wichtig, da das spätere Hinzufügen von Zusatzkomponenten die Entwicklung deutlich verlängern kann.

## Zusammenfassung

Für die Zulassung von Medizinprodukten ist eine geprüfte mechanische und elektrische Sicherheit und eine validierte Gebrauchstauglichkeit gesetzlich vorgeschrieben. Für den Erfolg eines Medizinproduktes ist die Umsetzung dieser Anforderungen allein nicht ausreichend. Mit dem Ziel, sowohl Anwender als auch Patienten nachhaltig zu begeistern, ist es mittlerweile notwendig, Usability Engineers und Produktdesigner in die Entwicklung einzubeziehen. Je frühzeitiger dies gelingt, umso größer ist das Potential des



nutzerzentrierten Designs und damit die Wahrscheinlichkeit des Markterfolges. Aufgrund der zunehmenden Komplexität und der immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten erfordert dies ein tiefgreifendes Verständnis der relevanten Normen und Regularien bei den beteiligten Partnern.

## Kontakt

Dipl.-Ing. Christian Thomas  
 ART-KON-TOR Produktentwicklung GmbH  
 Hainstraße 1  
 07743 Jena  
[www.art-kon-tor.de](http://www.art-kon-tor.de)

## Literaturverzeichnis

- Makary, M; Daniel, M. (2016): Medical error—the third leading cause of death in the US. In BMJ 2016; 353:i2139
- MDK Bayern (Hrsg) 2018: Jahresstatistik 2017, Behandlungsfehler-Begutachtung der MDK-Gemeinschaft Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745>
- DIN EN 62366-1:2017-07. Medizinprodukte - Teil 1: Anwendung der Gebrauchstauglichkeit auf Medizinprodukte. Beuth Verlag
- DIN EN 60601-1:2013-12. Medizinische elektrische Geräte - Teil 1: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit einschließlich der wesentlichen Leistungsmerkmale. Beuth Verlag



# 5G Sports – tragbare Technologiedemonstratoren im taktilen Internet

Lisa-Marie Lüneburg, Emese Papp und Jens Krzywinski

Der fünfte Mobilfunkstandard 5G wird zukünftig die Übertragung großer Datenmengen auch über weite Strecken nahezu in Echtzeit ermöglichen. Diese neue, praktisch latenzfreie Kommunikationstechnologie erlaubt einen von zeit- und ortsunabhängigen Austausch von Fähigkeiten und Kompetenzen zwischen Menschen und Maschinen. Damit werden haptisches Feedback über weite Entfernungen (taktilen Internet) und als Anwendung dessen neue Formen des räumlich verteilten Kooperierens und Lernens (Internet der Fähigkeiten und Kompetenzen) möglich. Das Exzellenzcluster CeTI der TU Dresden setzt mit seiner Forschung genau an dieser Stelle an: Eine Vielzahl möglicher interaktiver Anwendungen im Konsumenten-, aber auch im professionellen Bereich ist denkbar. In einer interdisziplinären Vorstudie des Technisches Designs und des 5G Lab Germany wurden mögliche Einsatzfelder identifiziert und durch Demonstratoren erlebbar gemacht. Als ein Anwendungsbereich wurde der Leistungssport identifiziert. Da Disziplin, hohe körperliche Belastung und Perfektion im Bewegungsablauf von professionellen Sportlern über einen langen Zeitraum abverlangt wird, bringt der Bereich ein hohes Potenzial und Akzeptanz mit sich, um effizientere Trainingsmethoden mit Hilfe von cyber-physischen Systemen zu entwickeln. Eine wesentliche Fragestellung der Vorstudie war außerdem zu untersuchen, inwieweit Demonstratoren das Erleben verschiedener Ebenen einer abstrakten Technologie ermöglichen können. In einer Primärstudie, die als Beobachtungen

während einer Messeveranstaltung des 5G Summit und weiteren öffentlichen Ausstellungen in Dresden 2018 durchgeführt wurden, konnten hierzu erste Erkenntnisse gewonnen werden.

## **1 CeTI — Center of Tactile Internet with Human-in-the-Loop**

Das Center of Tactile Internet with Human-in-the-Loop erforscht die Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine oder allgemeiner Cyber-Physical Systems (CPS) in realen, virtuellen und entfernten Umgebungen.

Intelligente Netze und adaptive CPS für quasi Echtzeit-Kooperationen mit Menschen sind hierbei entscheidende Herausforderungen. Dazu müssen aus unterschiedlichsten Disziplinen Erkenntnisse für neue Anwendungsfälle in Medizin, Industrie und dem Internet der Kompetenzen transferiert werden.

Zudem möchte CeTI durch Förderung des Technologietransfers in Start-ups und existierende Firmen erhebliche sozioökonomische und ethische Fortschritte initiieren. Ein Ziel von CeTI ist deshalb, in der Gesellschaft sichtbar zu sein und mit der Öffentlichkeit in Austausch zu treten. Das bedeutet, über die grundlegenden Veränderungen und Möglichkeiten der Innovationen von CeTI für Individuen und Gesellschaft in den Bereichen Medizin, Industrie, Bildung sowie im Alltagskontext zu informieren und dafür Akzeptanz zu erzeugen.

Demonstratoren können dafür geeignete Instrumente sein, Forschungserkenntnisse verständlich zu kommunizieren und Zuspruch zu finden. Diese Demonstratoren werden direkt am Körper des Menschen getragene robotische Systeme sein. Die Mensch-Maschine-Schnittstellen der Demonstratoren können menschliche Bewegungen erkennen und diese über Vibrationen oder sogar Krafteinwirkung lenken. Ihr Potenzial eine Verbesserung bzw. Beschleunigung von motorischen Lernprozessen zu erreichen, ist dabei ein zentraler Forschungsschwerpunkt von CeTI. Daraus leitet sich die Frage ab, wie dieses Potenzial mit Hilfe von Demonstratoren an die zukünftigen Nutzenden vermittelt werden kann.

Dieses Paper geht auf die Demonstratoren der Vorstudie, zwei Wearables und ein Exoskelett, zum Internet der Kompetenzen ein. In dem Anwendungsfall soll exemplarisch die weltweite Bereitstellung von Fähigkeiten, zum Beispiel eine bestimmte Art und Weise eine Choreographie zu tanzen bis hin zum Erlernen der ausgefeilten Technik eines professionellen Ruderersportlers, untersucht werden, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt.



Abbildung 1: Demokratisierung von Fähigkeiten, Visualisierung: Tina Bobbe

Über in die Textilien der Wearables bzw. Exoskelette integrierte Sensorik können die Bewegung eines Menschen aufgenommen werden. Diese Informationen werden dann in wenigen Millisekunden verarbeitet und in mathematischen Modellen des menschlichen Verhaltens beschrieben. Daraus abgeleitet kann über Aktoren in nahezu Echtzeit Feedback beispielsweise zur korrekten Ausführung der Bewegung an den Träger vermittelt werden. In welcher Form und für welche Situation solch ein System einen Mehrwert zum motorischen Lernen bringen kann, ist Teil der Forschung in CeTI, die parallel zu der technologischen Entwicklung läuft.

Hierfür werden im Verlauf des Projekts Demonstratoren benötigt, um Entwicklungsergebnisse mit Probanden auf ihre Eignung in den jeweiligen Kontexten evaluieren zu können. Sie sind also Vermittler von Forschungsergebnissen und zukünftigen Innovationen aus sowie innerhalb des Clusters. Die

direkt am Körper getragenen Systeme verschmelzen durch das Anziehen mit dem Nutzer. Aus diesem Grund sind Akzeptanz und Vertrauen in den Demonstrator für das Gelingen einer Untersuchung ausschlaggebend genauso wie für den Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft und Gesellschaft. Demonstratoren, die die Bedürfnisse der Nutzer treffen und den Innovationsgrad geeignet darstellen, könnten dazu einen großen Beitrag leisten.

Daraus ergibt sich die Hypothese: Um valide Aussagen über den Einsatz des taktilen Internets in den Anwendungsfeldern treffen zu können, werden Demonstratoren benötigt, die durch die Berücksichtigung der Nutzerbedürfnisse, die Glaubwürdigkeit und Akzeptanz der von ihnen übermittelten Innovationen bzw. Forschungsergebnisse steigern.

Dieses Paper möchte mit Hilfe einer Voruntersuchung die Frage klären, ob die Art und Weise der eingesetzten Demonstratoren geeignet ist, Akzeptanz für CPS zu schaffen und welche Elemente förderlich sein können, diese innovativen Zukunftsvisionen zu vermitteln.

Außerdem sollen Fragestellungen, die in die Demonstratorentwicklung eingeflossen sind, ausgewertet werden:

- Wie viel Verständnis hat das Publikum für das Thema? Wer ist die Zielgruppe? Welches Level an Komplexität kann dargestellt werden?
- Welche Reaktion zeigt der Nutzer auf den Demonstrator?
- Wie realitätsnah kann der Demonstrator umgesetzt werden? Wie kann in einem frühen Innovationsstadium die Glaubwürdigkeit eines Konzepts durch einen Demonstrator verstärkt werden?

## **2 Innovation und Prototyping**

### **Innovation**

In der wissenschaftlichen Literatur existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur Definition des Innovationsbegriffs. Allgemein werden Innovationen zumeist nur über ihren Grad an Neuartigkeit charakterisiert (Garcia und Calantone, 2002).

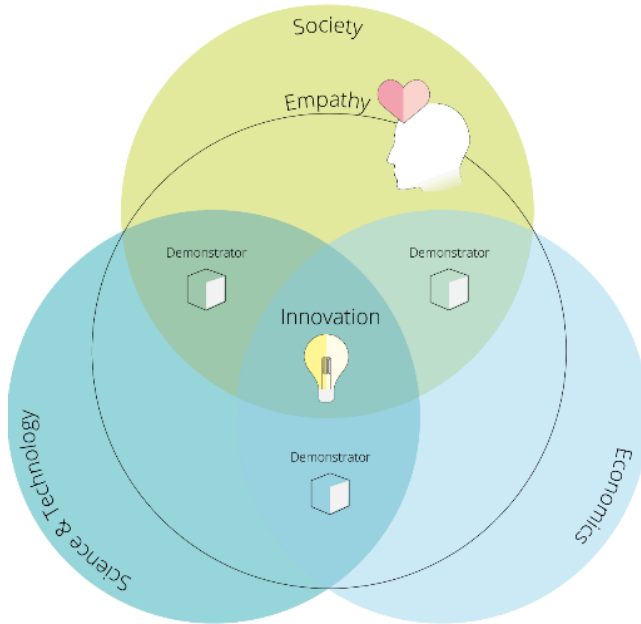


Abbildung 2: Demonstratoren als Vermittler von Forschung und Innovationen in Wirtschaft & Gesellschaft

Aktuelle Literatur geht jedoch davon aus, dass technologische und funktionale Vorteile gegenüber bestehenden Produkten keine Erfolgsgaranten für Innovationen sind (Chiesa und Frattini 2011). Je nach Branche werden 40 bis 90 % aller neuen Produkte von den Konsumenten nicht angenommen (Feiereisen et al., 2008). Die reine funktionale Überlegenheit reicht nicht, um Nutzer von einem neuen Produkt zu überzeugen. Der Erfolg von Innovationen hängt stark davon ab, wie Konsumenten Innovationen wahrnehmen und beurteilen (Henard und Szymanski 2001).

Dieses Phänomen, beschrieben aus der Perspektive der Wirtschaftswissenschaft, haben Verganti (2009) und Utterback früher erkannt und Theorien zur Design-inspirierten bzw. *Design-getriebenen Innovation* aufgestellt. Nach Utterback und Kollegen (2006) ist eine erfolgreiche Innovation die gelungene Balance zwischen Technologie, Markt und Bedeutung, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist. Der symbolische und emotionale Wert eines Produkts sowie die soziokulturellen Bedürfnisse des Nutzers werden gleichgewichtet zur eigentlichen Funktionalität.

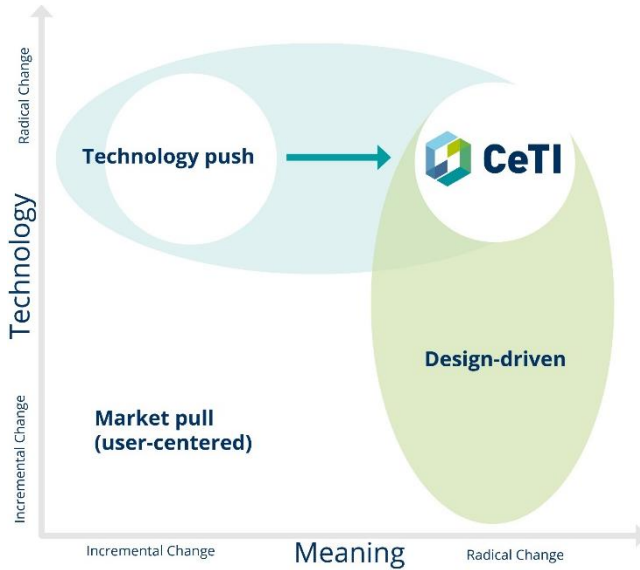


Abbildung 3: Designgetriebene Innovation nach Verganti

### St. Galler Business Innovation Model

Das *St. Galler Business Innovation Model* verbindet den Innovationsbegriff mit eben dieser Bedeutung bzw. Sinnhaftigkeit und stellt dazu Faktoren auf, die für eine bedeutungsvolle Innovation ausschlaggebend sind. Das Modell geht davon aus, dass Konsumenten sich insbesondere damit beschäftigen, ob und inwieweit sich die angebotenen Innovationen in ihren Alltag integrieren lassen, ihnen neue Erfahrungen ermöglichen und einen konkreten Nutzen versprechen (Gourville 2006).

#### *Sinnhaftigkeit*

Innovationen werden als sinnhaft beurteilt, wenn Konsumenten diese als begehrenswert, nützlich und zweckmäßig wahrnehmen (Arts et al. 2011). Konsumenten wägen zwischen den empfundenen Gewinnen und Verlusten, die sich aus ihrer Sicht durch die Annahme und den Einsatz einer Innovation in ihrem Alltag ergeben, ab (Tomczak et al. 2016). Die Wahrnehmung der Sinnhaftigkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab – von produktspezifischen,



technischen Überlegungen hinsichtlich der Funktionalität und Bedienungsfreundlichkeit der Innovation bis hin zu emotionalen und psychologischen Überlegungen wie beispielsweise der Reaktion des sozialen Umfeldes auf die Nutzung einer Innovation oder die Freude, die dabei empfunden wird (Tomczak et al. 2016).

Die *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (UTAUT) gibt einen systematischen Überblick über die Faktoren, die die wahrgenommene Sinnhaftigkeit einer Innovation entscheidend beeinflussen, nach Venkatesh et al. (2012):

- Leistungsfähigkeit
- erwarteter Aufwand
- sozialer Einfluss
- Begünstigungen
- hedonische Motivation
- Preis-Leistungs-Verhältnis
- Gewohnheit

Die vorgestellten sieben Faktoren zeigen, dass die Beurteilung der Sinnhaftigkeit einer Innovation ein vielschichtiger und komplexer Prozess ist (Tomczak et al. 2016). Das *St. Galler Business Innovation Model* sieht also die Sinnhaftigkeit einer Innovation als Hauptkriterium für die Kaufentscheidung (oder auch Akzeptanz) eines Kunden (Tomczak et al. 2016) an und die Neuartigkeit als Mittel um Aufmerksamkeit dafür zu generieren.

### Wirkung und Einsatz von Demonstratoren

Auch wenn die Erstellung von physischen Demonstratoren in Innovationsprozessen immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist in der wissenschaftlichen Literatur zu Demonstratoren als Medium des Wissenstransfers sowie als Vermittler von Innovation und deren Akzeptanz bisher wenig zu finden.

Die Wirkung digitaler Demonstratoren für Interaktions-Schnittstellen wird bereits in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben. Deren Erkenntnisse können auf physische Demonstratoren, die als Benutzerschnittstellen zwischen Mensch und Maschine dienen, im Prinzip angewendet werden.

Bell et al. (2013) und Kymalainen (2016) beschreiben aus der Sicht von Zukunftsforschern, wie Science-Fiction-Prototypen die technologischen Entwicklungen unserer Gegenwart beeinflussen. Innovationen und deren Verbreitung sind oftmals nachweislich inspiriert von fiktionalen Zukunftsbeschreibungen (Kymalainen, 2016), die technologische Neuheiten in einen soziokulturellen Kontext setzten und somit die Glaubwürdigkeit und die Wahrscheinlichkeit der Markteinführung einer neuen Technologie erhöhen.

In der Entwicklung digitaler Benutzerschnittstellen gelten Prototypen ebenfalls als Vehikel zur Entwicklung und Demonstration von Visionen innovativer Systeme (Bäumer et al. 1996).

Prototyping ist ein Entwicklungsansatz zur Verbesserung der Planung und Ausführung von Entwicklungsprojekten durch die Erstellung von ausführbaren Systemen für experimentelle Zwecke. Es eignet sich gut, um Erfahrungen in neuen Anwendungsbereichen zu sammeln und die inkrementelle oder evolutionäre Entwicklung von Produktsystemen zu unterstützen.

In der Regel ist es nicht wichtig, dass diese Prototypen die domänenspezifischen und technischen Aspekte detailliert abbilden (Bäumer et al., 1996). Es ist wichtig, dass sie die beabsichtigte Lösung skizzieren und leicht verständlich machen.

Des Weiteren geht aus der Studie hervor, dass sich Prototypen hervorragend eignen, das in einem Entwicklungsteam benötigte fachspezifische als auch technologische Wissen auszutauschen und die daraus entstehenden Erkenntnisse zusammen mit Experten zu evaluieren. Ebenso wurde beobachtet, dass Prototypen ein wichtiges Kommunikationsmittel zwischen Entwicklern und Endbenutzern darstellen. Prototypen können als Innovationsquelle nicht nur für einzelne Softwareprojekte, sondern auch für verschiedene Arten von Marketingforschung und Feldstudien genutzt werden (Bäumer et al., 1996).

Hier stellt sich die Frage, welche Unterschiede zwischen digitalen und cyberphysischen Prototypen bestehen und in welcher Form sie als Kommunikationsmittel eingesetzt werden können?

Die Demonstratoren, die als Vorstudien zu dem Projekt CeTI entstanden, werden nun im Folgenden erläutert und ihre Resonanz beim Publikum beschrieben.

### 3 Fallstudien im Kontext 5G Sports

Um die vielfältigen Möglichkeiten und das Innovationspotenzial von 5G aufzuzeigen, wurden in einem Studienprojekt des Technischen Designs in Zusammenarbeit mit dem 5G Lab Germany Fallstudien im Anwendungskontext Leistungssport erarbeitet. Daraus gingen drei durch Prototypen erlebbar und haptisch spürbare innovative Visionen hervor. Die funktionsfähigen 5G Sports-Prototypen konnten auf dem IEEE 5G Summit, einer internationalen Fachkonferenz im Bereich 5G, präsentiert und mit Anwendern getestet werden.

#### Modern Replacement

*Konzept:* Im professionellen Tanz müssen Replacement-Tänzer aufgrund eines spontanen Ausfalls der Originalbesetzung in sehr kurzer Zeit neue Choreographien oft räumlich vom restlichen Ensemble und dem Trainer getrennt lernen. Um die Effektivität zu steigern, wurde der Prozess durch nutzerorientiertes Denken neu strukturiert und dazu ein Wearable, das Modern Replacement, konzipiert. Die Tanzrichtung wird als haptisches Feedback mit einem Vibrationsgürtel an den Tänzer übertragen und die Formation der Mittänzer wird gleichzeitig in visueller Form auf den Boden gemappt, so hat der Lernende wichtige Anhaltspunkte beim Üben. Darüber hinaus kann der Replacement-Tänzer den gesamten Lernprozess in der dazugehörigen App iterativ durchlaufen und individualisieren.

*Funktion:* Der Präsentations- und Testdemonstrator, zu sehen auf Abbildung 4, besteht aus einem System aus Tablet, Vibrationsgürtel, Beamerprojektion sowie einem Monitor mit angeschlossenem Laptop. Alle Komponenten sind über einen Hotspot miteinander verbunden. In den Vibrationsgürtel sind acht Vibrationsmotoren integriert, die unabhängig voneinander ein zeitlich veränderbares Vibrationsfeedback geben können. Das Tablet ermöglicht über ein User Interface die Interaktion mit dem Vibrationsgürtel. Auf dem Monitor wird die einzuübende Tanzsequenz angezeigt. Die Beamerprojek-

tion zeigt die dazu räumlich angeordnete Tänzerformation. Diese Informationen sind, nicht wie im Konzept vorgestellt, manuell erstellt worden. So konnte mit einer Art des „Wizard-of-Oz“-Experiments die Vision des intelligenten Systems erlebt werden.

*Umsetzung:* Der Demonstrator konnte auf mehreren Veranstaltungen mit unterschiedlichen Nutzergruppen getestet werden. Auf dem 5G Summit war die Motivation der Messebesucher, sich mit dem Demonstrator auseinanderzusetzen, eher gering. Zum einen war durch den sehr hellen Raum eine optimale Projektion der Richtungsanzeige auf dem Boden nicht möglich. Zum anderen wurde der Demonstrator mittig auf einer Bühne präsentiert, wodurch die Hemmschwelle der Besucher, den Demonstrator auszutesten, mutmaßlich erhöht wurde. Eine schwache Identifikation mit dem Anwendungsfall „Zeitgenössischer Tanz“ des stark technologisch ausgerichteten Fachpublikums kann weiterhin angenommen werden. Eine vorgeschriebene Tanzabfolge mit Bewegungspfad war nicht vorhanden. Beim Sächsischen Staatspreis für Design wurde der Demonstrator ebenfalls ausgestellt, und gewann in der Kategorie „Nachwuchsdesign“. Auf weiteren Schülerevents und der Langen Nacht der Wissenschaften konnte es zudem von einem breiten Publikum getestet werden.

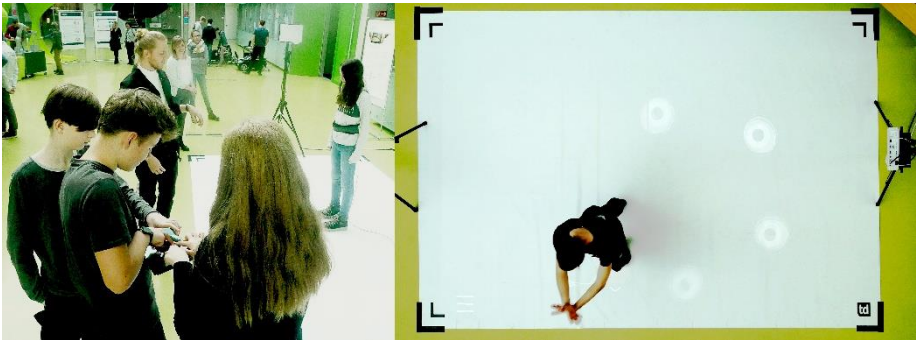


Abbildung 4 Modern Replacem<sup>ent</sup> getestet von Schülern und professionellem Tänzer

Schlussfolgernd daraus sah die nächste Präsentation eine Vorführung mit Tanzenden vor. Zudem wurde eine beispielhafte Sequenz den Testpersonen vorgeschlagen. Der Demonstrator konnte durch einen professionellen Tän-

zer evaluiert und von einem Schülerpublikum ausprobiert werden. Die Motivation und das Feedback fiel bei dieser Testung insgesamt positiver aus: Für den professionellen Tänzer wurden die Vorzüge der neuen Technologie von 5G deutlich und erlebbar. Er erlernte in sehr kurzer Zeit die Sequenz durch ein verbessertes räumliches Vorstellungsvermögen und den Richtungsimpulsen des Gürtels. Die Schülergruppe fand schnellen Zugang zu der Technologie und Funktionsweise des Demonstrators. Es war zu beobachten, dass im Gegensatz zu anderen Demonstratoren, eine größere Anzahl gemeinsam den Prototypen testen konnten und zusammen interagierten.

### Sensing in Motion

*Konzept:* Beim Volleyball-Training oder im normalen Spielablauf sind kleine Nuancen in der Technik der Spieler nicht immer zu erkennen bzw. nicht ohne Trainingsunterbrechung korrigierbar. Mit dem Sensoranzug „Sensing in Motion“ wird es möglich, sich seinen eigenen Bewegungsablauf durch einen digitalen Zwilling in Echtzeit abzubilden. Diesen kann man wiederum vergleichend über den von Profispielern legen mit der Option, direktes haptisches Feedback zu erhalten.



Abbildung 5 Sensing in Motion auf dem 5G Summit

*Funktion:* Der Demonstrator, zu sehen auf Abbildung 5, besteht aus Manschetten mit integrierten Sensoren, die dem virtuellen Avatar Bewegungsdaten senden. Dieser wird auf einem Monitor angezeigt. Zudem wird durch einen Vorführer\*in das Training eines Aufschlags mittels Ballmaschine vorgeführt.

*Umsetzung:* Auf der Fachmesse gab es die meisten Interessenten an diesem Demonstrator. Der Volleyball-Abschlag stellte für die Messebesucher eine geringe Hemmschwelle dar. Ein weiterer Vorteil war, dass der Demonstrator durch seinen Aufbau und die Geräuschkulisse (große Bewegung, lauter Abschlag, hohe Volleyball-Maschine) aus größerer Distanz gut sichtbar war und damit Aufmerksamkeit auf sich zog.

### **Lyne Soft ExoSuit**

*Konzept:* Das intelligente Anzugsystem dient zur aktiven Trainingsunterstützung von Ruderern. Es nimmt durch integrierte Sensorik alle relevanten Daten und Bewegungsabläufe des Sportlers auf. Auf Grundlage dieser Daten können die Aktoren mithilfe von Zugseilen und von speziell ausgeformten Oberarm- und Unterarmmanschetten durch gezielten Krafteintrag auf das Muskel-Skelett-System des Sportlers einwirken. Zum Einhalten des Schlagtakts liefert der Anzug zusätzlich akustische und haptische Signale. Die Überwachung und Anpassung der Einstellungen und Daten kann von dem Trainer über visuelle Interfaces wie Tablet oder VR-Brille auch über große Distanzen erfolgen.

*Funktion:* Der Präsentationsdemonstrator, zu sehen auf Abbildung 6, besteht aus einem Softexosuit der jackenähnlich angezogen werden kann. Darin sind 6 Servomotoren mit Seilzügen integriert. Außerdem sitzt am Rücken der Akku mit Prozessor, um die Motoren zu steuern. Dieser ist außerdem mit einem User Interface verbunden, das die aktuellen Leistungsdaten des Probanden als Demo auf einem Monitor zeigt, um die Echtzeitübertragung zu visualisieren. Um den Demonstrator unter annähernd realen Bedingungen vor Ort zu testen und den Kontextbezug herzustellen, wurde ein Ruder-Trainer genutzt.



Abbildung 6 Demonstartor des Lyne Soft ExoSuit auf dem 5G Summit

*Umsetzung:* Dieser Aufbau erzeugte einige Aufmerksamkeit bei den Messebesuchern und motivierte Probanden, den Demonstrator auszutesten. Die sichtbaren und durch LEDs betonten Motoren waren für die Interessenten erste Indikatoren der Funktionsweise des Anzugs. Zudem konnte die Bewegung der Motoren dadurch unmittelbar wahrgenommen werden. Die auf diese Weise inszenierte körpergetragene Technik erhöhte die Glaubwürdigkeit des Demonstrators.

Die teilweise schwierige Anpassung des Demonstrators an die Nutzer und das Gewicht des Modells wurde als nicht fortschrittlich empfunden. Das Fachpublikum erwartete ein leichteres textiles System. Andererseits war die Kraft der Motoren zu gering, um einen spürbaren Effekt wahrzunehmen und die Funktionsweise des Systems so schwer vorstellbar.

Resultierend aus unseren Beobachtungen kann gesagt werden, dass es eine große Herausforderung ist, Exoskelette in einem frühen Entwicklungsstadium realitätsnah und publikumswirksam zu testen. Hier sind die Anforderungen an Anatomie sowie die Motorperformance sehr hoch, ebenso wie die Erwartungshaltung der Probanden. Diese kann an dem gewählten Einsatzszenario liegen, aber auch durch bereits etablierte, ähnliche Visionen aus Science-Fiction-Filmen inspiriert sein.

Alle drei Prototypen sind am körpergetragene CPS. Ihre Ausführung und Wirkung auf den Körper fielen allerdings sehr unterschiedlich aus: Das Modern Replacement ist ein Wearable mit Vibrationsmotoren, die ein leichtes Feedback in Form von Impulsen an den Nutzer geben. Die Manschetten der Motion in Sens sind ebenfalls Wearables. Der Träger erhält allerdings ein rein visuelles Feedback. Im Kontrast dazu steht der Lyne Soft ExoSuit. Hier wird eine intensive, bewegungssteuernde Interaktion mit dem System erwartet. Verglichen mit digitalen Benutzerschnittstellen sind bei den am körpergetragenen Systemen weniger die Informationsaufbereitung als vielmehr eine für den Nutzer eindeutige haptische Interaktion ausschlaggebender Einflussfaktor für seine Bewertung der Sinnhaftigkeit und Glaubwürdigkeit. Durch den physischen Kontakt entsteht ein intensiveres Erlebnis der CPS. Das bringt jedoch mit sich, dass Fehler wie Softwarebugs oder zu große Latenzzeiten ebenso stärker wahrgenommen werden. Der Aufwand, glaubwürdige CPS zu präsentieren, ist nach diesen Erfahrungen um einiges größer als bei digitalen Prototypen. Deshalb ist es hier notwendig, die relevanten Einflussfaktoren in den spezifischen Einsatzfällen zu identifizieren und zu analysieren.

#### 4 Diskussion + Ausblick

Anhand des Feedbacks der Probanden lässt sich sagen, dass die Projekte Vorzüge und verschiedene Aspekte der 5G-Technologie erfolgreich zeigen konnten. Sie eröffnen ein Spektrum für vielfältige professionelle Anwendungen, die die Erweiterung der Fähigkeiten der Nutzer erzielen.

Die erlebbaren und begreifbaren Demonstratoren erwiesen sich als geeignetes Mittel zur Vermittlung von zukünftigen komplexen Technologien und denen sich daraus ergebenen Innovationen. Es hat sich auch gezeigt, dass die Akzeptanz für neue Technologien mit Beispielen aus populären Bereichen wie Sport erhöht werden kann.

Mit dem *St. Galler Business Innovation Model* lassen sich die Einflussfaktoren auf die Nutzerwahrnehmung der unterschiedlichen Demonstratoren erklären:

Die Leistungsfähigkeit wurde bei unterschiedlichen Anwendung je nach Erwartungshaltung verschieden bewertet und hat bei Exoskeletten einen größeren Einfluss als bei Wearables.



Der mit der demonstrierten Innovation in Verbindung gebrachte soziale Einfluss und die hedonische Motivation stellten sich als wichtige Faktoren heraus, auf die die Demonstratoren eine große Wirkung haben können. So wurden die Sportanwendungen als spannende und inspirierende Einsatzgebiete wahrgenommen. Je nach Interessenlage der Zielgruppe waren die Demonstratoren mehr oder weniger frequentiert. Zudem ist auch der Faktor der Gewohnheit zu nennen. Die gewählten Sportanwendungen sind keine alltäglichen Aktivitäten der meisten Nutzer in den Zielgruppen. Es sind also Felder, die die Nutzer interessieren, aber nicht zukünftig die Gewohnheiten verändern würden. Im Fall des *Sensing in Motion*, einer inkrementellen Innovation, wurde die nahe Umsetzbarkeit als positiv wahrgenommen. Schlussendlich wird immer auch die Frage nach dem Preis-Leistungs-Verhältnis gestellt, auf die ein Innovationsdemonstrator eine glaubwürdige Antwort bieten sollte. Diese Beobachtung zeigen, dass Demonstratoren sich hervorragend eignen, um Innovationen aus dem Bereich der CPS in der frühen Entwicklungsphase realitätsnah erlebbar zu machen. Sie ermöglichen zudem die Analyse wichtiger Einflussfaktoren auf den Erfolg der jeweiligen Innovation. Dazu eignen sich die Faktoren des *St. Galler Business Innovation Model*, durch das nachvollzogen werden kann, welche Einflussgrößen im jeweiligen Kontext wichtig sind.

## Danksagung

Dieses Projekt wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden.

## Literaturverzeichnis

- Arts J., Frambach R., Bijmolt T. 2011: Generalizations on consumer innovation adoption: A meta-analysis on drivers of intention and behavior. *Int J Res Marketing* 28(2):134–144
- Bäumer, D. & Bischofberger R., Walter & Lichter, Horst & Züllighoven, Heinz. 1996: User Interface Prototyping - Concepts, Tools, and Experience. 532-541. 10.1109/ICSE.1996.493447.

- Bell, Frances & Fletcher, Gordon & Greenhill, Anita & Griffiths, Marie & Mclean, Rachel. 2013: Science fiction prototypes: Visionary technology narratives between futures. *Futures*. 50. 15–24. 10.1016/j.futures.2013.04.004.
- Bendel, Oliver: Wearables, Springer Gabler, Wiesbaden  
<https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/wearables-54088/version-368816> Revision von Wearables vom 07.01.2019
- Chiesa und Frattini 2011. Chiesa V, Frattini F. 2011: Commercializing technological innovation: learning from failures in high-tech markets. *J Product InnovationManag* 28(4):437–454
- Feiereisen et al., 2008. Feiereisen S, Wong V, Broderick AJ (2008) Analogies and mental simulations in learning for really new products: the role of visual attention. *J Product InnovationManag* 25(6):593–607
- Garcia R, Calantone R (2002) A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review. *J Product InnovationManag* 19(2):110–132
- Gourville JT (2006) Eager sellers & stony buyers. *Harvard Business Rev* 84(6):98–106
- Grimpe, C. & Fier, H. J. 2010: *Technol Transf* 35: 637. <https://doi.org/10.1007/s10961-009-9140-4>
- Henard DH, Szymanski DM (2001) Why some new products are more successful than others. *JMarketing Res* 38(3):362–375
- Kymalainen, T. 2016: Science Fiction Prototypes as a Method for Discussing Socio-Technical Issues within Emerging Technology Research and Foresight. *Athens Journal of Technology & Engineering*
- Lee, Edward A. 2006: Cyber-Physical Systems: Are Computing Foundations Adequate? NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap. Austin, TX
- Tomczak T., Vogt D., Frischeisen J. 2016: Wie Konsumenten Innovationen wahrnehmen Neuartigkeit und Sinnhaftigkeit als zentrale Determinanten. In: Hoffmann C., Lennerts S., Schmitz C., Stölzle W., Uebernickel F. (eds) *Business Innovation: Das St. Galler Modell*. Business Innovation Universität St. Gallen
- Utterback, J. M., Sanderson, S. W., Tether, B., Verganti, R., Ekman, S., Vedin, B.-A. & Alvarez, E. (2006) Preface: Design-Inspired Innovation, World Scientific Publishing Company, 2006.
- Venkatesh V, Thong JY, Xu X (2012) Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS Quarterly* 36(1):157–178
- Verganti, R. 2009 : *Design Driven Innovation: Changing the Rules of Competition by Radically Innovating What Things Mean*, Harvard.

## **Kontakt**

Dipl.-Ing. Lisa-Marie Lüneburg  
PhD candidate at CeTI  
*[lisa-marie.lueneburg@tu-dresden.de](mailto:lisa-marie.lueneburg@tu-dresden.de)*

Dipl.-Ing. Emese Papp  
*[emese.papp@tu-dresden.de](mailto:emese.papp@tu-dresden.de)*

Technische Universität Dresden  
Fakultät Maschinenwesen  
Professur für Technisches Design  
01062 Dresden, Germany



# Verbesserte Ergonomie durch Mensch-Roboter-Kollaboration als sozio-technisches System

Daniel Rücker, Kristin Paetzold und Rüdiger Hornfeck

## Einleitung

### Motivation

In dieser Veröffentlichung soll untersucht werden, ob vorhandene Methoden aus dem Bereich der sozio-technischen Systeme (STS) genutzt werden können, um Mensch-Roboter-Kollaborationen (MRK) hinsichtlich ihrer Ergonomie zu optimieren.

MRK gilt als wichtige Disziplin in der zukünftigen Gesellschaft, die in vielen Bereichen mit dem Menschen in Kontakt treten wird (Pollmann et al., 2018). Sie deckt dabei ein sehr breites Spektrum ab: von der Fertigung in der Industrie, über die Servicerobotik, hin zu Unterhaltungsindustrie und dem Gesundheitssystem, insbesondere der Altenpflege (Bauer et al., 2008). Neuartige Anwendungsgebiete wie z.B. Nanoroboter (Kant, 2017) werden dabei noch hinzukommen. Dadurch entstehen sehr unterschiedliche Anforderungen, wobei dem Menschen eine hohe Bedeutung zukommen muss. Ein Roboter wird als System entwickelt, der Mensch hingegen legt jedoch ein, hauptsächlich durch dem MRK-Entwickler unbekannte Erfahrungen geprägtes, wenig beeinflussbares Verhalten an den Tag. Zwar kann einem Menschen ein bestimmtes Verhalten in einer MRK beigebracht werden, jedoch erscheint es sinnvoll, die bereits vorhandenen Fähigkeiten und Bedürfnisse bei der Entwicklung zu berücksichtigen, um das Potenzial einer MRK bestmöglich auszuschöpfen (Behymer & Flach, 2016), (Adams, 2002), (Charalambous et al., 2017).

Es stellt sich also die Frage, wie man die Fähigkeiten und Bedürfnisse des Menschen bestmöglich berücksichtigen kann. Unserer Meinung nach kann hier eine Kombination der STS und der Ergonomie für die Entwicklung von MRKs einen Beitrag leisten.

Der Ansatz der STS berücksichtigt die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen dem technischen und dem sozialen Subsystem, sowie der Umwelt. Somit fließt die menschliche Beteiligung der MRK von Beginn an systematisch in die Entwicklung mit ein (Charalambous et al., 2017).

Die Disziplin der Ergonomie als Lehre der Mensch-Arbeit liefert dabei nicht systematische Aspekte, sondern inhaltliche Aspekte, die über den STS-Ansatz einfließen können. Dabei umfasst der englische Begriff *ergonomics* nicht nur biomechanische Faktoren, was im Deutschen oft fälschlicherweise als einziger Untersuchungsgegenstand der Ergonomie betrachtet wird, sondern auch kognitive und organisatorische Faktoren. Deswegen stützen wir uns hier auf den englischen Begriff.

Während STS sich damit beschäftigt, *wie* der Mensch in die Entwicklung einzubinden ist, kann mit der Ergonomie beschrieben werden, *was* einzubinden ist.

### Forschungsfrage

Zusammengefasst ergibt sich damit die folgende Frage, die von dieser Veröffentlichung beantwortet werden soll:

*"Welche Methoden des sozio-technischen Systemansatzes gibt es, und wie können diese für die Entwicklung Ergonomie-optimierter MRK-Anwendungen angepasst werden?"*

### Hypothesen

Es gibt eine Reihe von Hypothesen, auf die wir unsere Arbeit stützen, die im Folgenden benannt und kurz diskutiert werden. Dies soll dabei helfen, die Handlungsgrundlage der vorgestellten Forschung transparent darzustellen, um die Relevanz für den Leser schneller zu entscheiden.

*STS kann für MRK eingesetzt werden.*

Seinen Ursprung hat der STS-Ansatz im Gebiet der Arbeitsorganisation großer Menschengruppen, deren Arbeit stark durch den Einsatz von Technologie geprägt ist. Heutzutage wird dieser Ansatz verstärkt für die Entwicklung von Software eingesetzt. Obwohl diese beiden Einsatzgebiete keine große Überlappung mit MRK verzeichnen, so ist der Grundgedanke, das Zusammenwirken einer Anzahl Menschen mit einer Anzahl Maschinen und Technologien systematisch zu entwickeln, auch auf MRK anwendbar.

*Methoden für STS können Ergonomiefaktoren einbeziehen.*

Da es neben dem technischen auch ein soziales Subsystem in einem STS gibt, ist die Berücksichtigung von Ergonomiefaktoren grundsätzlich möglich. Obwohl üblicherweise unter dem sozialen Subsystem eine Organisation aus mehreren Individuen verstanden wird, kann auch eine genauere Betrachtung einzelner oder mehrerer Individuen durch den Einsatz von Ergonomiefaktoren vorgenommen werden.

*Durch die Verwendung oder Adaptierung bereits bestehender Methoden, sowie Maßnahmen zur Erstellung von Methoden, wird eine hohe Relevanz der resultierenden Methode erwartet.*

Das Verwenden bestehender Methoden hat den Vorteil, dass der Autor der bestehenden Methode bereits Überlegungen angestellt hat, was eine sinnvolle Vorgehensweise für den jeweiligen Kontext ist. Weitere Überlegungen, die man zusätzlich anstellt, helfen dabei, die bestehende Methode noch weiter zu verfeinern. Wird die Methode integriert, stützt sie sich auf die Abwägungen des Methoden-Autors. Bei einer Adaptierung besteht hingegen die Möglichkeit, dass zugrundeliegende Mechanismen aufgelöst werden, sodass hier eine zusätzliche Evaluation durchgeführt werden muss. Unabhängig von der Vorgehensweise ist eine abschließende Evaluation der resultierenden Methode unerlässlich.

## Definitionen

Definition Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)

Wir stützen uns beim Begriff Mensch-Roboter-Kollaboration auf die Definition von (Bütepage & Kragic, 2017). Diese beschreiben die umfassendere

Mensch-Roboter-Interaktion als ein Feld, welches sich in drei Unterbegriffe unterteilen lässt: Instruktion, Kooperation und Kollaboration. Alle drei Begriffe eint, dass sie einen Informationsaustausch zwischen Mensch und Roboter, sowie eine geteilte Arbeitsumgebung beinhalten. Kooperation und Kollaboration haben darüber hinaus gemeinsam, dass Mensch und Roboter dasselbe Ziel verfolgen. Das erste Alleinstellungsmerkmal der Kollaboration ist, dass Teilaufgaben, die von Mensch und Roboter gleichzeitig bearbeitet werden, Wechselbeziehungen aufweisen, bzw. miteinander verflochten sind. Das zweite Alleinstellungsmerkmal ist nach dieser Definition gegenseitiges Lernen, Anpassen und Vertrauen der beiden Kollaborationspartner untereinander. Obwohl diese Definition ursprünglich für ein Kollaborationsszenario aus einem Menschen und einem Roboter formuliert wurde, so verliert unserer Meinung nach die Definition in einem n:n-Szenario nicht ihre Gültigkeit. Um die in der Motivation erwähnte große Bandbreite der MRK abdecken zu können, verstehen wir unter dem Begriff MRK sowohl 1:1- als auch n:n-Systeme sowie 1:n- bzw. n:1-Systeme.

#### Definition sozio-technische Systeme (STS)

Als Definition für STS stützen wir uns auf die Definition von (Baxter & Sommerville, 2011), die wiederum (Badham et al., 2000) zitieren. Demnach verfügt ein STS über die folgenden fünf Charakteristika (Baxter & Sommerville, 2011):

- STS sollten aus Teilsystemen mit Wechselbeziehungen bestehen
- STS sollten sich an Ziele der externen Umgebung anpassen, bzw. diese verfolgen
- STS haben eine interne Umgebung bestehend aus separaten, aber verflochtenen technischen und sozialen Systemen
- STS besitzen Zielgleichheit. Anders gesagt können die Ziele auf verschiedene Arten erreicht werden. Dies impliziert, dass während der Systementwicklung Gestaltungsentscheidungen getroffen werden müssen.
- Die Leistungsfähigkeit des Systems stützt sich auf die verbundene Optimierung des technischen und sozialen Subsystems. Die Konzentration auf eines dieser Systeme bis hin zum Ausschluss des anderen führt wahrscheinlich zu einer verschlechterten Systemleistung und -nutzen



Auch wenn dies keine umfassende Definition eines STS liefert, so ist doch zu berücksichtigen, dass ein solches System aufgrund seiner Diversität nur auf einer sehr abstrakten Ebene und auf der Basis von Aussagen und Prinzipien, und damit nicht allumfassend hierarchisch beschrieben werden kann. Daher wurde sich auf diese vielzitierte Quelle gestützt.

### Definition Ergonomie und Ergonomiefaktoren

Wir verwenden die Definition der International Ergonomics Association (IEA) (International Ergonomics Association, 2019) für die im Englischen synonym zu verwendenden Begriffen *human factors* und *ergonomics* (zusammengefasst HFE):

*„Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance.*

*Practitioners of ergonomics and ergonomists contribute to the design and evaluation of tasks, jobs, products, environments and systems in order to make them compatible with the needs, abilities and limitations of people.*

*Ergonomics helps harmonize things that interact with people in terms of people's needs, abilities and limitations.“* (International Ergonomics Association, 2019)

Weiterhin unterteilt die IEA HFE in drei Gebiete: physikalische Ergonomie, kognitive Ergonomie und organisationelle Ergonomie. Jedem dieser Bereiche werden eine Vielzahl von Ergonomiefaktoren zugeordnet. In (Rücker et al., 2018) untersuchten die Autoren bisherige Veröffentlichungen auf benannte Ergonomiefaktoren und stellten einen Katalog solcher Faktoren zusammen.

### Diskussion relevanter Quellen

#### Principles for sociotechnical Systems

In (Cherns, 1976) beschrieb Cherns 9 Prinzipien, die bei der Erstellung von STS beachtet, bzw. eingesetzt werden sollten. Diese Quelle gilt als eine sehr grundlegende Quelle im Bereich STS. 1987 nahm sich Cherns diese Prinzipien noch einmal vor, und passte sie den zwischenzeitlichen Entwicklungen

an (Cherns, 1987). Ebenfalls als sehr grundlegend wird die Veröffentlichung von Clegg (Clegg, 2000) angesehen, der sich im Jahr 2000 diese Prinzipien noch einmal vornahm und sie nach eigener Argumentation stringent von den ursprünglichen Prinzipien ableitete. Wiederum auf dieser Basis gab es eine Überarbeitung (Waterson & Eason, 2019).

Auch wenn diese Veröffentlichungen keine Methoden bereitstellen, so sind die Prinzipien grundsätzlich als Referenz zu betrachten und können während jeder Phase der Systementwicklung Unterstützung bieten.

### Work Domain Analysis

Bei der *Work Domain Analysis* (WDA) handelt es sich um eine Methode aus dem System der *Cognitive Work Analysis* (Vicente, 1999). Durch die Beschreibung des Systems auf verschiedenen Abstraktionsebenen soll sie helfen, das System zu erkunden, und somit eine bessere Beschreibung des Systems zu gewährleisten. Die resultierende Abstraktionshierarchie (AH) besteht aus den folgenden fünf Ebenen (Read et al., 2015):

- *Functional Purpose*: Die Existenzberechtigung des Systems, bzw. die Zwecke, die das System erfüllen soll.
- *Values & Priority Measures*: Kriterien, die bewerten können, ob die *functional purposes* erfüllt werden.
- *Purpose Related Functions*: Die Funktionen, die zur Erfüllung der *functional purposes* nötig sind.
- *Object Related Processes*: Beschreiben die Prozesse, die die Umsetzung der *purpose related functions* unterstützen.
- *Physical Objects*: Die tatsächlich einsetzbaren, bzw. zu verwendenden Objekte und Individuen.

In (Read et al., 2015) beschreiben die Autoren eine solche AH, die die Entwicklung eines STS als eigenes STS darstellt. In (Missen et al., 2017) ist eine solche AH beispielhaft für einen Spielplatz entwickelt worden und veranschaulicht dadurch den Vorgang der WDA.

*“A Sociotechnical Method for Designing Work Systems”* (Waterson et al., 2002)

Diese Veröffentlichung beschreibt eine sehr abstrakte Methode zur Entwicklung eines STS, sodass sie sich dafür eignet, um weitere Methoden in sich zu aufzunehmen. Die Methode gliedert sich in die folgenden Abschnitte:

- *Formation of overall view of the system*: Hier wird der Anwender der Methode aufgefordert, mehrere mögliche Alternativen für das System über die Beschreibung mehrerer Gesichtspunkte zu entwickeln. Zur Bewertung wird eine Anzahl sogenannter *decision criteria* vorgeschlagen. Nach der Bewertung soll eine Präferenzreihenfolge festgelegt werden.
- *Specification of requirements*: Dieser Schritt wird nicht weiter erläutert, es wird auf den Einsatz externer Methoden verwiesen.
- *Specification and analysis of tasks*: Dieser Schritt wird nicht weiter erläutert, es wird lediglich erwähnt, dass zu diesem Zeitpunkt eine Aufteilung in Teilaufgaben möglich sein sollte.
- *Initial mandatory allocations*: Hier werden die *allocations* für Aufgaben mit eindeutiger Zuordnung vorgenommen.
- *Provisional allocation between human and machine*: Auf der Basis von sogenannten *decision criteria* wird ermittelt, welcher der Kollaborationspartner eine Aufgabe übernehmen sollte, bzw. ob die Aufgabe gemeinsam gelöst werden soll, und anschließend der Grund für die Entscheidung benannt.
- *Provisional allocation between humans*: Nach der Beschreibung des Status Quo werden alternative *allocations* entwickelt, wobei die Beschreibungen deutlich knapper ausfällt als bei der *provisional allocation between human and machine*, und nur auf sogenannten *user roles* basieren.
- *Provisional dynamic allocations*: Unter diesem Punkt wird die Möglichkeit gegeben, eine *allocation* während des Systembetriebs änderbar zu machen. Dabei sollen die Rahmenbedingungen festgehalten werden, unter denen eine solche Änderung erlaubt ist, die sich auf die in den vorangegangenen Phasen durchgeführte Untersuchung der *allocations* stützen. Es wird auch explizit darauf hingewiesen, dass dieses Vorgehen derzeit nur als Empfehlung

einzustufen ist, da das Verständnis der zugrundeliegenden Zusammenhänge den Autoren noch zu dürftig ist.

- *Global examination of allocations*: In diesem Schritt werden die *provisional allocations* gegenüber dem Systemüberblick, den verwendeten *decision criteria* sowie allgemeinen Rahmenbedingungen, wie z.B. Personalaufwand gegenüber verfügbaren Personal auf Widersprüche, überprüft.
- *Proposed allocations*: Zuletzt sollen alle alternativen *allocations*, alle Präferenzen, die Rollen der beteiligten Menschen und Maschinen benannt, sowie alle *design decisions* und deren *rationale* dokumentiert werden.

Es bleibt relativ offen, welche Schritte notwendig sind, um von den *proposed allocations* zur konkreten Umsetzung des Systems zu kommen. Es bedarf also weiterer Methoden, um konkrete Aufgabenbeschreibungen für Mensch und Roboter zu generieren.

*“Protos: Foundations for Engineering Innovative Sociotechnical Systems”* (Chopra et al., 2014)

In dieser Veröffentlichung stellen Chopra et al. eine Methode vor, nach der *Requirements Engineering* für STS durchgeführt werden kann. Die Autoren liefern sehr genaue Definitionen für die verwendeten Begriffe, sodass die Methode nachvollzogen werden kann. Sie verwenden außerdem mathematische Ausdrücke, um die Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Größen auszudrücken, sodass der Prozess stets nachvollziehbare und überprüfbare Ergebnisse liefert, die auf wohlbeschriebenen Annahmen und Definitionen basieren.

Eine Besonderheit ist dabei, dass Anforderungen über diese Methode iterativ in Verbindlichkeiten übersetzt werden. Dabei werden die *requirements* als *needs* einzelner Stakeholder formuliert, und durch Umformulierungen, weitere Operationen sowie Annahmen der Reihe nach in ein Konstrukt aus *commitments* übersetzt. Die Autoren definieren das standardmäßige Ende eines *design paths*, also der Erstellung eines Systemdesigns so, dass sich für alle verbliebenen Anforderungen die jeweiligen Stakeholder der Erfüllung dieser Anforderung verpflichten. Dabei ist anzumerken, dass sich diese Anforderun-

gen im Verlauf eines *design paths* abändern, und somit eine triviale Verpflichtung aller Stakeholder zu all ihren Anforderungen direkt zu Beginn eines *design paths* nicht identisch mit dem Ergebnis eines *design paths* ist.

Diese *commitments* liefern eine Abstraktion, die zunächst flexibler ist als eine feste Zuweisung einzelner Aufgaben zu Mensch bzw. Roboter, allerdings auch die Formulierung einzelner Tätigkeiten unterstützt. Auf diese Weise kann für jedes *commitment* eine Liste von einzelnen Tätigkeiten entstehen, die wiederum genutzt werden kann, später den tatsächlichen Ablauf einer MRK zu regeln. Für diese Überführung von *commitments* in Tätigkeiten sind weitere Methoden erforderlich, da dies von Chopra et al. nicht mehr behandelt wird.

*“Tomorrow’s Human–Machine Design Tools: From Levels of Automation to Interdependencies”*  
(Johnson et al., 2018)

Die Autoren argumentieren, dass die Aufgabenaufteilung in einer Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) nicht aus binären Entscheidungen besteht, in denen klar ist, welche Teilaufgabe welchem Interaktionspartner zugewiesen werden sollte. Stattdessen beschäftigen sie sich mit den Wechselbeziehungen zwischen Mensch und Maschine während einzelner Teilaufgaben. Dabei wollen die Autoren die Effektivität von Maschinen für MMI nicht durch erhöhte Automatisierung steigern. Stattdessen wollen sie auf Basis einer *Interdependence Analysis* (IA) die Maschine zu einem besseren Teamplayer machen, indem die Maschine die Wechselbeziehungen zum Menschen besser berücksichtigt, und hierdurch bedingt die Effektivität der Maschine steigern.

Zentraler Bestandteil der Methode sind die dem *coactive design* entlehnten drei grundsätzlichen Arten von Wechselbeziehungen: *observability*, *predictability* und *directability*. *Observability* macht eine Information oder ein Wissenselement über sich selber, das Team, die Aufgabe oder die Umgebung anderen Beteiligten zugänglich. *Predictability* meint, dass eine Aktion so vorhersehbar sein sollte, dass Andere sich bei der Planung ihrer Vorgehensweise darauf verlassen können. *Directability* bedeutet, dass sich Akteure gegenseitig beeinflussen können sollen.

Neben diesen drei Größen werden die Wechselbeziehungen zwischen Mensch und Maschine auf zwei unterschiedliche Weisen in einer Tabelle verdeutlicht.

Zum einen durch vier Spalten, je zwei für Mensch und Maschine. Diese jeweils zwei Spalten drücken aus, ob der jeweilige Akteur eine bestimmte Tätigkeit durchführen kann oder nicht, sowie ob der Partner ihn dabei unterstützen kann oder nicht.

Zum anderen kann ein Feld aufgezeichnet werden, in dem für jede Aufgabe spaltenweise die einzelnen Komponenten der Maschine, sowie der Mensch als eigene Spalte angelegt wird. In diesen Spalten kann nun im Vergleich zum Abschnitt mit den vier Spalten für jedes Subsystem der Maschine und den Menschen entschieden werden, ob es der Aufgabe zuträglich ist, ob die Gefahr einer gegenseitigen Schwächung von Mensch und Maschine entstehen könnte, oder ob ein Informationsverlust entstünde. Basierend auf der möglichen Beteiligung der verschiedenen Systeme an der Bewältigung einer Aufgabe können nun verschiedene Workflows miteinander verglichen werden. Dabei können die ausgefüllten Spalten darüber informieren, wie sich eine Beteiligung des jeweiligen verwendeten Systems auswirken könnte. In ihrer Methode gehen die Autoren jedoch nicht darauf ein, wie die übergeordnete Aufgabe einer MMI heruntergebrochen werden soll, es werden nur die Begriffe *tasks* und *capacities* verwendet, wobei *tasks* in *capacities* heruntergebrochen werden.

### **Vorstellung und Diskussion eines vorläufigen, integrierten STS-Ansatzes zur Entwicklung von Ergonomie-optimierter MRK**

Im Folgenden formulieren wir aus den diskutierten Methoden einen integrierten Ansatz zur Entwicklung einer MRK, die über den Ansatz der STS zur optimierten Ergonomie des zu entwickelnden Systems führen soll. Dabei soll dieser Ansatz in der vorliegenden Veröffentlichung lediglich als eine Diskussionsgrundlage für das weitere Vorgehen dienen, der Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben.

Um zunächst einen Gesamtüberblick über das zu entwickelnde System zu gewinnen, sollen zum einen eine AH auf Basis der WDA und der erste Abschnitt der Methode von (Waterson et al., 2002) verwendet werden. Vorteile

der AH sind, dass ein Ansatz zum Erforschen des Systems vorliegt, der die verschiedenen Abstraktionsstufen eines Systems als verschiedene Blickwinkel einsetzt. Weiterhin wird die Möglichkeit geboten, Ergonomiefaktoren z.B. über die *Values & Priority Measures* einfließen zu lassen. Außerdem können die *Values & Priority Measures* eine gute Grundlage für die Formulierung von Anforderungen bilden. Demgegenüber regt der erste Methodenschritt von Waterson et al. durch die Aufforderung zur Definition einzelner Aspekte des Systems auf andere Weise dazu an, sich Gedanken über Grundeigenschaften des Systems zu machen. Auch bereits an dieser Stelle können Ergonomiefaktoren als *decision criteria* eingebunden werden, sodass diese bereits von Anfang an in die Systementwicklung einfließen.

Auf Basis dieser grundlegenden Beschreibung wird eine Anforderungsanalyse durchgeführt, die der prinzipiellen Vorgehensweise von (Chopra et al., 2014) folgt. Ziel ist dabei die Formulierung von *commitments*. Obwohl die Methode in erster Linie für STS entwickelt wurde, die mehrere Individuen beinhaltet, so bietet sie aufgrund ihrer allgemeingültigen Formulierungen genug Flexibilität, auch ein System aus einem Menschen und einem Roboter zu betrachten. Um diese *commitments* aus den *requirements* zu entwickeln, kann die vorgeschlagene Vorgehensweise der *design paths* eingesetzt werden.

Als nächstes müssen auf der Basis dieser *commitments* Aufgaben formuliert, und wiederum diese in Teilaufgaben heruntergebrochen werden, wobei dies für das breite Spektrum der MRK kaum in einer einzigen Methode zu bewerkstelligen ist. Als fundamentaler Ansatz hierfür kann die *Hierarchical Task Analysis* (Stanton, 2006) dienen, ebenfalls kann die AH bei der Formulierung unterstützen. Wichtig ist dabei, dass die Aufgaben soweit aufgespalten werden, dass eine Teilaufgabe nur vom Menschen oder nur vom Roboter erledigt werden kann, sodass kein Wechsel des Bearbeiters nötig wird. Dies ist wichtig, damit in der IA eine klare Zuordnung der jeweiligen Teilaufgabe möglich ist.

Eindeutig zuordenbare Aufgaben können nun entweder Mensch oder Roboter zugewiesen werden.

Für jede Aufgabe kann jetzt eine IA der zugehörigen Teilaufgaben auf Basis von (Johnson et al., 2018) durchgeführt werden. Dies liefert eine Reihe von Workflows, die miteinander verglichen werden können. Hier können auch die

Ergonomiefaktoren einfließen, in der Form, dass sowohl für einzelne Teilaufgaben als auch für den gesamten Workflow eine Bewertung anhand verschiedener Ergonomiefaktoren erfolgen kann. Da es auch hier keine offensichtliche Zuordnung gibt, muss der Entwickler des Systems die relevanten Ergonomiefaktoren anhand der jeweiligen Teilaufgabe sowie der Beschreibung der Ergonomiefaktoren individuell auswählen.

Dieser ausgewählte Workflow muss nun noch einmal gegen die entwickelten *commitments* sowie gegen die zugrundeliegende AH auf Widersprüche oder Abweichungen abgeglichen werden.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

In der vorliegenden Veröffentlichung haben wir uns mit der Frage beschäftigt, ob der Ansatz der sozio-technischen Systeme dazu genutzt werden kann, Mensch-Roboter-Kollaboration hinsichtlich ihrer Ergonomie zu optimieren. Dazu haben wir nach der Motivation des Handlungsbedarfs die genannten Begriffe definiert und die Ergebnisse unserer Recherche bestehender STS-Methoden vorgestellt, die unserer Meinung nach in Frage kamen. Dabei identifizierten wir die Veröffentlichungen von (Waterson et al., 2002), (Chopra et al., 2014) und (Johnson et al., 2018) als essenzielle Bestandteile für einen prototypischen STS-Ansatz zur Ergonomie-Optimierung von MRK. Diesen Ansatz diskutierten wir im Anschluss genauer und erläuterten dabei die Schnittstellen zwischen den einzelnen Methoden. Darüber hinaus diskutierten wir, inwiefern der vorgeschlagene Ansatz bei der Ergonomie-Optimierung helfen kann.

Im nächsten Schritt muss dieser prototypische Ansatz ausformuliert und evaluiert werden. Mit den ermittelten Methoden und dem ausgearbeiteten Ansatz kann anhand eines beispielhaften Anwendungsszenarios untersucht werden, inwiefern die einzelnen Schritte des Ansatzes aufeinander angepasst werden müssen, welche Probleme bei der Entwicklung einer MRK mittels dieses Ansatzes auftreten und wie sie gelöst werden können.



## Literaturverzeichnis

- Adams, J. A. (2002). Critical considerations for human-robot interface development. In Proceedings of 2002 AAAI Fall Symposium (S. 1-8).
- Badham, R., Clegg, C. & Wall, T. (2000). Socio-technical theory. Handbook of Ergonomics. New York, NY: John Wiley.
- Bauer, A., Wollherr, D. & Buss, M. (2008). Human–Robot Collaboration: A Survey. International Journal of Humanoid Robotics, 05 (01), 47-66.
- Baxter, G. & Sommerville, I. (2011). Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. Interacting with Computers, 23 (1), 4-17.
- Behymer, K. J. & Flach, J. M. (2016). From Autonomous Systems to Sociotechnical Systems: Designing Effective Collaborations. She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation, 2 (2), 105-114.
- Bütepage, J. & Kragic, D. (2017, 29. Mai). Human-Robot Collaboration: From Psychology to Social Robotics. Verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1705.10146v1>
- Charalambous, G., Fletcher, S. R. & Webb, P. (2017). The development of a Human Factors Readiness Level tool for implementing industrial human-robot collaboration. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91 (5-8), 2465-2475.
- Cherns, A. (1976). The Principles of Sociotechnical Design. Human Relations, 29 (8), 783-792.
- Cherns, A. (1987). Principles of Sociotechnical Design Revised. Human Relations, 40 (3), 153-161.
- Chopra, A. K., Dalpiaz, F., Aydemir, F. B., Giorgini, P., Mylopoulos, J. & Singh, M. P. (2014). Protos: Foundations for engineering innovative sociotechnical systems. In 2014 IEEE 22nd International Requirements Engineering Conference (RE). Proceedings : August 25-29, 2014, Karlskrona, Sweden (S. 53-62). Piscataway, NJ: IEEE.
- Clegg, C. W. (2000). Sociotechnical principles for system design. Applied ergonomics, 31 (5), 463-477.
- International Ergonomics Association. (2019). Definition and Domains of Ergonomics | IEA Website. Zugriff am 05.03.2019. Verfügbar unter <https://www.iea.cc/whats/index.html>
- Johnson, M., Bradshaw, J. M. & Feltovich, P. J. (2018). Tomorrow's Human–Machine Design Tools: From Levels of Automation to Interdependencies. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 12 (1), 77-82.
- Kant, V. (2017). Nanotechnology and HFE: critically engaging human capital in small-scale robotics research. Cognition, Technology & Work, 19 (2-3), 419-444.
- Missen, L., Stevens, N. J. & Salmon, P. M. (2017). A Sociotechnical Systems Analysis Approach to Playground Design. Proceedings from Contemporary Ergonomics & Human Factors 2017, 35-42.
- Pollmann, K., Janssen, D., Vukelic, M. & Fronemann, N. (2018). Homo Digitalis. Eine Studie über die Auswirkungen neuer Technologien auf verschiedene Lebensbereiche für eine

- menschengerechte Digitalisierung der Arbeitswelt (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation -IAO-, Stuttgart, Hrsg.), Stuttgart. Verfügbar unter urn:nbn:de:0011-n-4941891
- Read, G. J. M., Salmon, P. M., Lenné, M. G. & Stanton, N. A. (2015). Designing sociotechnical systems with cognitive work analysis: putting theory back into practice. *Ergonomics*, 58 (5), 822-851.
- Rücker, D., Hornfeck, R. & Paetzold, K. (2018). Investigating Ergonomics in the Context of Human-Robot Collaboration as a Sociotechnical System. In J. Chen (Hrsg.), *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems. Pro-ceedings of the AHFE 2018 International Conference on Human Factors in Ro-bots and Unmanned Systems*, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA (Advances in Intelligent Systems and Computing, volume 784, Bd. 784, S. 127-135). Cham: Springer.
- Vicente, K. J. (1999). *Cognitive work analysis. Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Waterson, P. & Eason, K. (2019). Revisiting the Sociotechnical Principles for System Design (Clegg, 2000). In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alex-ander & Y. Fujita (Hrsg.), *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018) (Advances in Intelligent Systems and Com-puting, volume 824, Bd. 824, S. 366-374)*. Cham, Switzerland: Springer.
- Waterson, P. E., Older Gray, M. T. & Clegg, C. W. (2002). A sociotechnical meth-od for designing work systems. *Human factors*, 44 (3), 376-391.

## Kontakt

Daniel Rucker, M.Sc.  
 Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck  
 Technische Hochschule Nürnberg  
 Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung  
 90489 Nürnberg  
<https://www.th-nuernberg.de/cmp>

Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold  
 Universität der Bundeswehr München  
 Institut für Technische Produktentwicklung  
 85577 München  
<https://www.unibw.de/produktentwicklung>

# Modellbasierter Systems Engineering Ansatz zur effizienten Aufbereitung von VR-Szenen

Atif Mahboob, Stephan Husung, Christian Weber, Andreas Liebal und Heidi Krömker

## Einleitung

Ein wesentliches Ziel während der Produktentwicklung ist die frühzeitige Absicherung der Produkteigenschaften auf Basis der definierten Produktmerkmale unter Beachtung der äußeren Randbedingungen. Digitale Modelle und Methoden unterstützen den Produktentwickler bei der frühzeitigen virtuellen Evaluation des Produktes. Die Produkte sind heute interdisziplinär, komplexer und der Wettbewerb zwischen Unternehmen steigt. Die Unternehmen müssen heute schnell die neuen Technologien und Methoden adaptieren, um konkurrenzfähig auf dem Markt zu bleiben. Virtual Reality (VR)-Technologien können visuelle, akustische und/oder taktile Darstellungen des Produktes innerhalb einer virtuellen Umgebung in den frühen Phasen der Produktentwicklung ermöglichen. Eine solche Darstellung kann den Produktentwickler bei einer frühen Evaluierung des Designs unterstützen. In der Industrie existieren bereits vielfältige VR-Anwendungen, die aber stark auf visuelle Evaluation und wenig auf Verhaltenssimulation fokussieren. Dies basiert primär auf der relativ einfachen Erstellung des geometrischen Modells durch Import des CAD-Modells in VR-Werkzeuge. Allerdings besteht keine direkte Übertragungsmöglichkeit für die Simulationsdaten in VR. Die Simulationen/Animationen werden separat unter Anwendung normalerweise programmierbasierter Lösungen, die sehr Zeitaufwendig und nicht (immer) wiederverwendbar sind, entwickelt. (Mahboob et al. 2017a) identifizieren folgende Ursachen für eingeschränkte Anwendungen der VR in der Industrie:

- Die Aufbereitung der VR-Modelle und dazugehörige Simulationen sind sehr zeitaufwendig und damit kostenintensiv,

- die Modelle bieten geringe Wiederverwendungsmöglichkeiten,
- nach der Aufbereitung können die Modelle nur limitierte Anpassungen leisten. In bestimmten Fällen können kleine Änderungen eine völlig neue Aufbereitung erfordern.

In den verschiedenen VR-Systemen wie z.B. CAVE, Powerwall oder Head Mounted Display (HMD) werden unterschiedliche VR-Werkzeuge genutzt. Diese Werkzeuge lassen zwar unter Umständen einen Austausch der geometrischen Modelle zu, sind aber in Bezug auf eine Verhaltensbeschreibung miteinander nicht kompatibel. Das bedeutet, dass eine für CAVE-VR entwickelte Verhaltensbeschreibung nicht mit HMD verwendet werden kann. Im Hinblick auf die hier genannten Einschränkungen wird eine neue Methodik benötigt, die unabhängig von der VR-Darstellungstechnologie eine ganzheitliche Beschreibung der VR-Szenen ermöglicht. Diese Beschreibungsmethodik muss in den verschiedenen VR-Systemen wiederverwendbar sein und dadurch auch den Aufbereitungsaufwand reduzieren können.

Ein neuer Ansatz für die Entwicklung der heutigen Produkte ist modell-basiertes Systems Engineering (MBSE). Der MBSE-Ansatz unterstützt die interdisziplinäre Produktentwicklung und die Beherrschung der Produktkomplexität. Gerade im Hinblick auf Mechatronisierung und Digitalisierung mit Kernaspekten wie flexible Produktion, wandelbare Fabriken, optimierte Logistik, intelligente Verwendung von Daten oder kundenzentrierte Lösungen bietet ein modell-basierter Ansatz einen erheblichen Vorteil gegenüber dokumentbasierten Ansätzen. Systems Modeling Language (SysML) ist eine standardisierte, graphische Modellierungssprache für die Implementierung des MBSE-Ansatzes. In SysML können die Anforderungen, die Struktur und das Verhalten des Produktes spezifiziert werden. Derzeit versuchen immer mehr Unternehmen, MBSE im Entwicklungsprozess nutzbringend zu integrieren. Daher werden die SysML-Modelle parallel zum Design entwickelt, um verschiedene Analysen (wie z.B. FMEA, Funktionale Sicherheit (FuSi), Verhalten) am Design durchzuführen (Husung et al. 2018). Es gibt bereits Vorarbeiten, die SysML mit CAD (Moeser et al. (2015, 2016)) und PLM-Systemen integrieren (Eigner et al. 2014, Meissner et al. 2014, Eigner et al. 2017). Eine Integration der SysML-Modelle mit den bereits existierenden VR-Werkzeugen kann zur einer leichten Aufbereitung der VR-Szenen beitragen. Daher

werden verschiedene Use-Cases des Produktes durch SysML-Modelle beschrieben (Mahboob et al. 2018a), die später als Kern der echtzeitfähigen Simulation in VR dienen und das gesamte Simulationsmodell steuern.

Eine Simulation des Produktverhaltens in den frühen Phasen der Entwicklung hilft dem Produktentwickler, mehr Erkenntnisse über das Produkt und sein Verhalten in den späteren Lebensphasen zu gewinnen. Neben dem Produkt ist darüber hinaus aber auch der zugehörige Kontext zu betrachten, der aus mit dem Produkt interagierenden Akteuren und den jeweiligen Umgebungen gebildet wird (Weber et al. 2016). Produkt-, Akteur- und Umgebungsmodell werden weiter in dem Beitrag als „Teilmodelle“ bezeichnet. Eine bestimmte Simulation des Produkts zusammen mit dem jeweiligen Kontext bildet einen späteren lebensphasen-spezifischen Use-Case des Produkts, der zu einem besseren Verständnis des Produkts und seines Verhaltens dient. Die für den Entwickler notwendige virtuelle Darstellung des Produkts innerhalb eines Kontextes kann sehr gut mit Hilfe von Virtual Reality (VR) realisiert werden.

In diesem Beitrag wird eine Methodik präsentiert, die mit Hilfe der SysML-Modelle eine Simulation in VR ermöglicht. Die SysML-Beschreibung wird als Kern der Simulation dienen und das gesamte Simulationsmodell steuern. Weiterhin wird erläutert, wie die SysML-Beschreibung mit einem VR-Tool und einem Physikberechnungstool verbunden werden kann. Die in CAVE und HMD durchgeführten Simulationen wurden im Rahmen von Usability Tests evaluiert. Aus diesen Tests werden Ergebnisse präsentiert, die sich mit Verwendungsschwerpunkten in VR und der Zufriedenheit bei der Beurteilung von Produkten in VR beschäftigt haben. Schlussendlich wird ein Beispiel-Simulationsszenario in der CAVE-VR und einem Head Mounted Display (HMD) diskutiert.

## Methodik

### Vorgehensmodell

Die Entwicklung der VR-Technologien ist im Großteil durch die Spieleentwicklungs- bzw. Entertainmentindustrie vorangetrieben worden. Die verfügbaren Lösungen sind stark auf einen jeweiligen Anwendungsfall bzw. bestimmte Hardware hin entwickelt und optimiert worden. Der Fokus liegt dabei meistens auf der Qualität der Visualisierung und auf der Benutzerfreundlichkeit

des **entwickelten** Systems. In solchen Fällen lässt sich zumeist die gesamte Anwendung mit allen möglichen Verhalten vorausplanen und somit auch im Voraus Programmieren, z. B. ein VR-Spiel, 3D-Kino usw. Im Gegensatz dazu basieren VR-Anwendungsfälle in der Produktentwicklung zwar ebenfalls auf Design-Reviews oder Produktevaluierung. In solchen Fällen stehen aber unter anderem Echtzeitfähigkeit der Simulation, Abbildung des Verhaltens, Aufbereitungsaufwand, Interoperabilität zwischen Werkzeugen und Wiederverwendbarkeit im Vordergrund, was durch Vorprogrammierung nicht gewährleistet werden kann. Außerdem ist die programmierungsbasierte Aufbereitung der VR-Szenen sehr zeitaufwendig und bietet nur eine begrenzte Wiederverwendung. Um die Wiederverwendung der VR-Inhalte zu ermöglichen, bietet sich der Trennungsansatz von Weber et al. (2016) als ein sinnvoller Weg an. Der Trennungsansatz teilt das gesamte VR-Modell in Akteur, Produkt und Umgebung auf, wie in Abbildung 1 dargestellt.

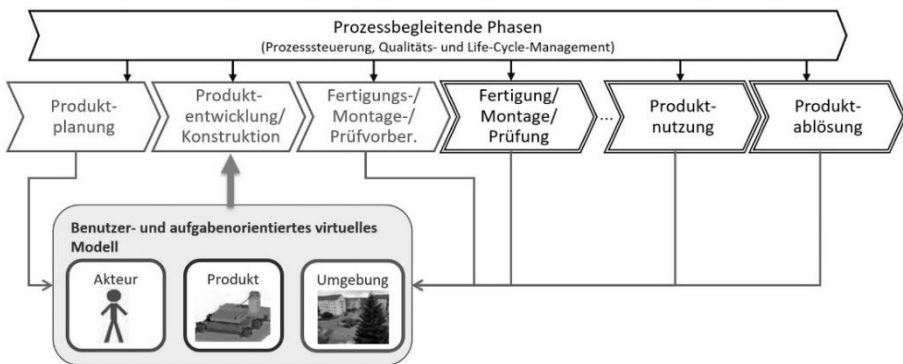


Abbildung 1: Informationen über Umgebung und Akteure aus den Produktlebensphasen (Weber et al. 2016)

Der Akteur repräsentiert eine Person, die in einer Produktlebensphase eine wichtige Rolle spielt, z. B. einen Fertigungstechniker, Monteur oder Kunden. Als Umgebung ist die lebensphasenspezifische Umgebung zu betrachten, wie z. B. eine akteursbedingte Nutzungsumgebung oder Fertigungsmaschine als Fertigungsumgebung. Diese Trennung kann zur Wiederverwendung der VR-Inhalte beitragen, setzt aber voraus, dass die Teilmodelle sowie deren Interaktion getrennt beschrieben wird. SysML kann dies erfüllen, indem die Teilmodelle und ihre Interaktion beschrieben werden können (Mahboob et

al. 2017b). Zwar lässt sich das Verhalten der Teilmodelle mit SysML beschreiben, jedoch ist eine Berechnung der physikalischen Eigenschaften (z. B. Kollisionsberechnung) nicht möglich. Eine Simulation in VR ohne Berücksichtigung der korrekten physikalischen Eigenschaften der Objekte ist für den Produktentwickler nur von geringem Wert. Daher ist es notwendig, eine externe physikalische Berechnung neben der SysML-Beschreibung durchzuführen.

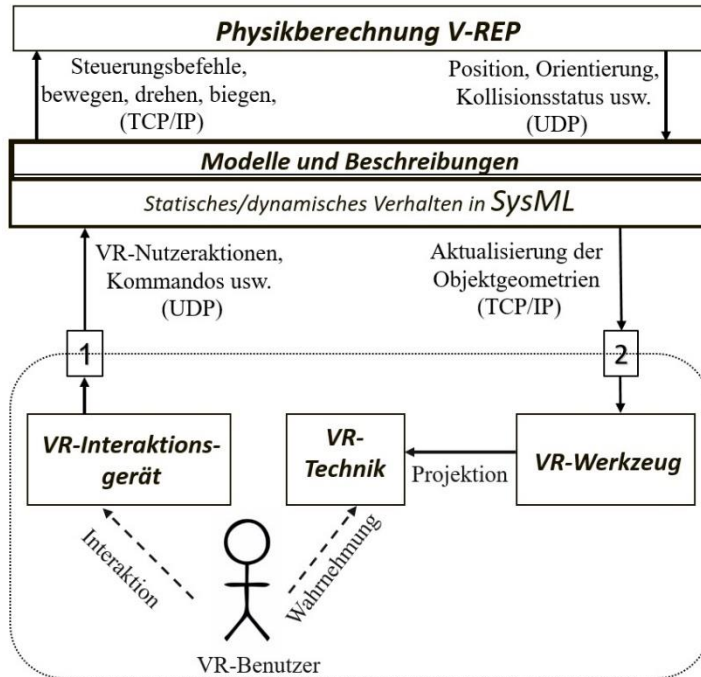


Abbildung 2: Informationsflüsse während einer VR-Simulation

Abbildung 2 zeigt den Informationsfluss während der Simulation in VR zusammen mit den in der Simulation beteiligten Software- und Hardwarewerkzeugen. *Modelle und Beschreibungen* beinhalten in SysML beschriebene Teilmodelle, die die Struktur- und Verhaltensbeschreibung einschließen. Die kompletten Inhalte der VR-Szene werden nach *V-REP* (Physikberechnungswerkzeug) übertragen. Daraus besteht eine Szene in *V-REP* aus vereinfachten

Geometrien, an denen physikalische Berechnung durchgeführt werden können. Es wurde eine Kopplung zwischen dem SysML-Werkzeug und *V-REP* entwickelt, damit das Modell in *V-REP* durch SysML-Beschreibungen gesteuert und auch das Feedback nach der Berechnung zurückgespielt werden kann. Mit *VR-Technik* ist das Hardwaresystem zur Darstellung der VR-Szene gemeint, z. B. eine CAVE oder ein HMD. *VR-Werkzeug* ist die Visualisierungssoftware, z. B. RTT-Deltagen für CAVE-VR oder die Unity/ Unreal-Engine für HMD. *VR-Interaktionsgerät* repräsentiert ein Eingabegerät, das eine Interaktion mit virtuellen Objekten in den Szenen ermöglicht. 1 und 2 stehen für die Schnittstelle zwischen der Beschreibung und dem VR-System. Neuartig an diesem Ansatz ist die Beschreibung der VR-Szene durch Modellierung anstatt Programmierung sowie die Physikberechnung in einem externen Werkzeug anstatt im VR-Werkzeug. Der Mehrwert an diesem Ansatz ist die Tatsache, dass eine solche Beschreibung in den verschiedenen VR-Systemen mit wenig Aufwand wiederverwendet werden kann. Nachfolgend werden zwei konkrete Anwendungsfälle dieser Methodik für eine Simulation in einer CAVE und in einem HMD im Detail diskutiert.

### Simulation in den verschiedenen VR-Systemen

Abbildung 3 zeigt den konkreten Fall für CAVE-VR (die Punkte 1 und 2 beziehen sich auf die Schnittstellen nach Abb. 2). *RTT-Deltagen* wird in unserem Fall als VR-Werkzeug genutzt und das geometrische Modell in Form einer Szene entwickelt. Die Szene beinhaltet nur die geometrischen Daten ohne Integration von Animationen/Simulationen. Damit kann das geometrische Modell in der CAVE gerendert werden. Die Interaktion mit den Szenenobjekten wird durch das in CAVE-VR verfügbare Interaktionsgerät *Flystick* geschaffen. Zu dem Zeitpunkt kann der Benutzer die Inhalte der Szene in der CAVE sehen bzw. den Viewpoint ändern und navigieren. Die Simulation wird erst nach der Anpassung der Schnittstellen 1 & 2 möglich.

Daher wurden beide Schnittstellen in Deltagen in Form eines Plug-Ins entwickelt. Das Plug-In schickt die Flystick-Daten (Position, Orientierung und Knopfinformationen) an das SysML-Beschreibungstool. Dieses interpretiert die empfangenen Daten und entscheidet, was in *V-REP* gemacht werden soll (siehe Abb. 2). Nach der Berechnung in *V-REP* werden die Objektinformationen zurückgeholt und mit den alten Objektständen in SysML verglichen. Die



Informationen über geänderte Objekteigenschaften werden an *RTT-Deltagen* geschickt. Die neuen Eigenschaften beinhalten u. a. neue Positionen, Orientierungen und Kollisionsinformationen über die Objekte. Das Plug-In empfängt die Daten und ändert entsprechend die Objekteigenschaften in der Szene, die gleichzeitig in der CAVE aktualisiert werden. Dadurch entsteht eine echtzeitfähige Simulation des Produkts in CAVE-VR.

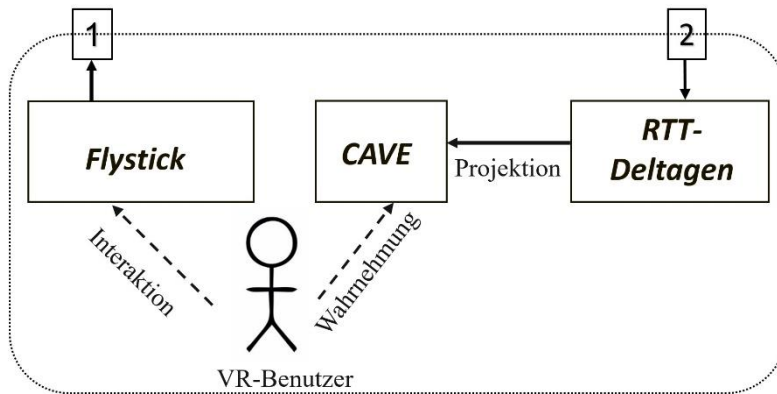


Abbildung 3: Simulation in CAVE-VR

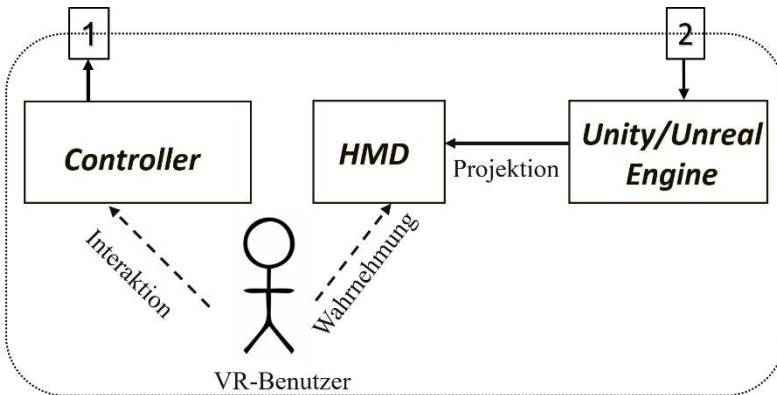


Abbildung 4: Simulation in HMD

Abbildung 4 zeigt den Fall für ein HMD. Hier werden die Unity oder Unreal Engine als VR-Werkzeug genutzt, die die Inhalte der VR-Szene in einem HMD rendern. Das geometrische Modell in HMD kann durch Import das für die CAVE genutzte Modell verwenden und auch die Animationen/Simulation müssen nicht separat programmiert/entwickelt werden. Ein HMD kann beispielsweise eine HTC-VIVE oder Oculus Rift sein und das Interaktionsgerät können ein Vive Controller bzw. Oculus Controller sein. Um die Simulation des Produktes zu ermöglichen, wurde hier ebenfalls ein Plug-In geschrieben, das die Controllerdaten an die SysML-Beschreibung schickt, die aktualisierten Objekteigenschaften empfängt und die Objekte in der Szene anpasst. Dadurch entsteht eine echtzeitfähige Simulation in HMD.

Der in diesem Kapitel präsentierte, modellbasierte Ansatz hat deutliche Vorteile gegenüber programmierungsbasierten Ansätzen. Die Nutzung der SysML-Beschreibung ermöglicht eine Darstellungstechnologie-unabhängige Beschreibung der VR-Szene, die mit relativ wenig Aufwand in den verschiedenen VR-Systemen wiederverwendet werden kann. Außerdem verzichtet diese Methodik auf eine Vorprogrammierung der Simulation in den VR-Werkzeugen. Daraus folgt weniger Beschreibung im VR-Werkzeug und mehr in SysML, was im Endeffekt eine Wiederverwendung der Beschreibung in den verschiedenen VR-Systemen ermöglicht. Abbildung 5 zeigt die Simulationen in CAVE und HMD im Kontext einer Wohnzimmerumgebung mit einem Staubsaugermodell.



Abbildung 5: v. l. n. r. Simulation in CAVE-VR (Mahboob et al. 2018a) und Simulation in HMD (Mahboob et al. 2018b)

## Benutzungsschnittstelle

Die Trennung des gesamten VR-Modells in die Teilmodelle Akteur, Produkt und Umgebung ermöglicht einerseits – wie beschrieben – eine Wiederverwendbarkeit sämtlicher Teilmodelle in anderen Systemen, andererseits aber auch die schnelle und einfache Erweiterung des vorhandenen VR-Systems um weitere Teilmodelle, z. B. Auswahl von mehreren Produktvarianten oder heterogenen Nutzergruppen als Akteure. Dies hat zur Folge, dass die Benutzungsschnittstelle erheblich komplexer ausfallen kann und deren Entwicklung und Integration gesondert berücksichtigt werden muss. Unabhängig von der verwendeten Art der Benutzungsschnittstelle zeigen bestehende VR-User Interface-Guidelines (beispielsweise Bowman et al. 2008, Dörner et al. 2013, McMahan et al. 2014) ihre hohe Content- und Technologieabhängigkeit. Unklar ist bisher, wie technologieübergreifenden Designs der Benutzungsschnittstellen für die verschiedenen VR-Technologien, wie z.B. FASP/Cave, Powerwall, HMD, systematisiert und nutzerzentriert für die Produktentwicklung realisiert werden können. Eine Herausforderung hierbei ist bereits, dass VR-Benutzer je nach Zugehörigkeit zu einer Produktlebensphase unterschiedliche Anforderungen an die Benutzung des VR-Systems und an die Interaktion mit den Teilmodellen haben.

Im Rahmen von Usabilitytests der beiden gezeigten Testsysteme CAVE und HMD wurden Probanden dazu befragt, was ihre Erwartungen an die Arbeit mit den virtuellen Systemen sind. Abbildung 6 zeigt hierzu, aus welchen Fachbereichen die 13 befragten Probanden kamen.

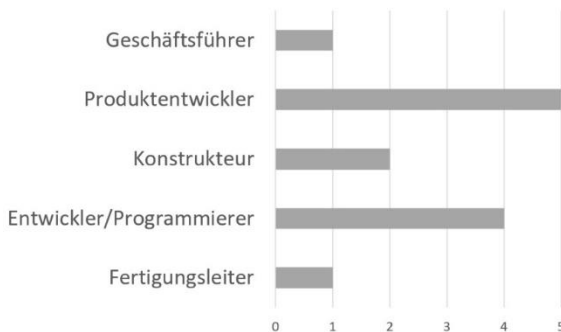


Abbildung 6: Verteilung der befragten Experten zum abteilungsrelevanten Ziel im Umgang mit VR

Auf Basis einer Kategorisierung von (Zorriassatine et al. 2003) haben die Experten ihre Schwerpunkte für die Nutzung von VR bewertet, wie in Abbildung 7 dargestellt. *Visualisierung* dient der Evaluation von Produktgestalt und Produkterscheinung. *Passungsuntersuchungen* bieten beispielsweise die Möglichkeit der Bewertung von Fehlertoleranzen. *Eigenschaftstests* steht für die Bewertung der Produktfunktionalitäten unter Zuhilfenahme von Simulationen. *Fertigungsuntersuchungen* beziehen sich auf die eigentliche Fertigung eines Produktes mit beispielsweise Fertigungsprozessen und Produktionsplanung. Die *Human Factor Analyse* beinhaltet die Untersuchung menschlicher Faktoren im Produktnutzungskontext.

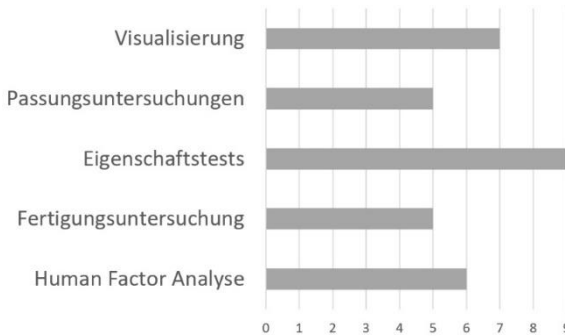


Abbildung 7: Schwerpunkte der Befragten für die Nutzung von VR

Der Fokus dieses Vorgehensmodells liegt auf den VR-Systemen CAVE und HMD. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass die Experten mit der Beurteilung von Produkten in VR allgemein betrachtet im Wesentlichen sehr zufrieden sind.

Im direkten Vergleich wird der CAVE allerdings keine Relevanz mehr beige-messen. 85% der Befragten gaben an, einem HMD-System den Vorzug zu geben und 15% würden je nach Arbeitsziel entscheiden. Dies liegt sowohl an ökonomischen Gründen als auch an Gründen des Platzbedarfes, der Immersion und der Präsenz. Einzig und allein für Entscheider hat die CAVE noch ihre Daseinsberechtigung im Rahmen von Designentscheidungen (Antwort des Geschäftsführers).

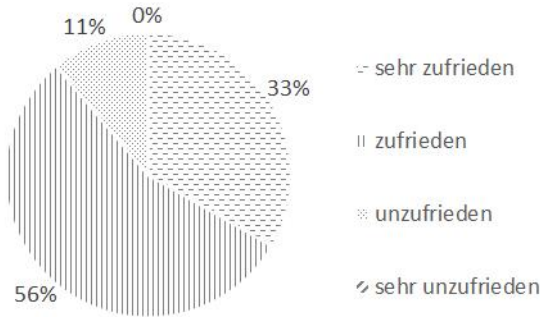


Abbildung 8: Zufriedenheit bei der Beurteilung von Produkten in VR

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag präsentiert eine neuartige Modellstruktur zur effizienten Aufbereitung der VR-Szene. Sie enthält eine externe Berechnung der physikalischen Eigenschaften anstelle der fixen Programmierung in VR-Werkzeugen. Dabei wird SysML als Beschreibungssprache der VR-Szene verwendet, wodurch eine darstellungstechnologieunabhängige (CAVE und HMD) Beschreibung ermöglicht wird. Die Kopplung zwischen SysML und dem Physikberechnungstool ermöglicht eine allgemeingültige Beschreibung der VR-Szene, die in den verschiedenen VR-Systemen genutzt werden kann. Die Beschreibung lässt sich in den verschiedenen VR-Systemen mit wenig Aufwand wiederverwenden und reduziert dadurch den Aufbereitungsaufwand. Außerdem dienen die beiden Simulationsbeispiele (in CAVE und HMD) unter Verwendung der gleichen Beschreibung als Indiz für die Allgemeingültigkeit und Wiederverwendbarkeit der SysML-Beschreibung. Mit Hilfe **eines konkreten Anwendungsfalls** (in CAVE und HMD) wurde die Anwendbarkeit der SysML-Beschreibung aufgezeigt. Eine Expertenbefragung hat gezeigt, dass die bisherigen Ergebnisse zufriedenstellend sind. In Zukunft wird die Methodik für die Nutzung in Smartphone-VR evaluiert. Die Verwaltung von SysML-Modellen bzw. Teilmodellen muss noch einzeln untersucht werden. Hierzu gibt es Vorarbeiten von Eigner et al. (2014, 2017), die zu berücksichtigen sind.

## Literaturverzeichnis

- Bowman, D. A., Coquillart, S., Froehlich, B., Hirose, M., Kitamura, Y., Kiyokawa, K., Stuerzlinger, W., 2008, "3D User Interfaces: New Directions and Perspectives", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 28, Nr. 6, S. 20-36, 2008
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., Jung, B., 2013, „Virtual und Augmented Reality (VR/AR)“, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, eXamen.press, 2013
- Eigner, M., Dickopf, T., Apostolov, H., 2017, „System Lifecycle Management - An Approach for Developing Cybertronic Systems in Consideration of Sustainability Aspects“, Procedia CIRP, Vol. 61, pp. 128-133.
- Eigner, M., Muggeo, C., Dickopf, T., Faißt, K.G., 2014, „An Approach for a Model Based Development Process of Cybertronic Systems“, Proceedings of the 58th Ilmenau Scientific Colloquium (IWK), Ilmenau, Germany, September 8-12, 2014
- Husung, S., Lindemann, G., Korobov, S., Hamester, M., Kleiner, S., 2018, „Use Case driven Model-based Systems Engineering for industrial applications“, In EMEASEC 2018 / TdSE 2018, Berlin, Germany, November 05-08, 2018.
- Mahboob, A., Liebal, A., Husung, S., Weber, C., Krömker, H., 2017a, „A method for fast and easy configuration of Virtual Reality (VR) Environments for Analysis of Technical Systems“, 59th – Ilmenau Scientific Colloquium (IWK), 11-15.09.2017, Ilmenau
- Mahboob, A., Weber, C., Husung, S., Liebal, A., Krömker, H., 2017b, „Model Based Systems Engineering (MBSE) approach for configurable product use-case scenarios in Virtual Environments“, 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), 21-25.08.2017, Vancouver
- Mahboob, A., Husung, S., Weber, C., Liebal, A., Krömker, H., 2018a, „SysML Behaviour Models for Description of Virtual Reality Environments for Early Evaluation of a Product“, DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference – Design 2018, 21 – 24.05.2018, Dubrovnik, Croatia
- Mahboob, A., Husung, S., Weber, C., Liebal, A., Krömker, H., 2018b, „An Approach for Building Product Use-Case Scenarios in Different Virtual Reality Systems“, International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, ASME 2018 IDETC/CIE, 26-29.08.2018, Quebec City, Canada
- McMahan, R. P., Kopper, R., Bowman, D. A., 2014, "Principles for Designing Effective 3D Interaction Techniques", K. S. Hale; K. M. Stanney (ed.): Handbook of virtual environments: Design, Implementation, and Applications, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014, pp. 285-311
- Meissner, H., Cadet, M., Stephan, N., Bohr, C., 2014, „Model-Based Development Process of Cybertronic Products and Production Systems“, Advanced Materials Research, Vol. 1018, pp. 539-546.

- Moeser, G., Grundel, M., Weikiens, T., Kümpel, S., Kramer, C., Albers, A. (2016), „Modell-basierter mechanischer Konzeptentwurf: Ergebnisse des FAS4M-Projektes“, Tag des Systems Engineering, Herzogenaurach, October 25-27, 2016, Carl Hanser, München, pp. 417–428
- Moeser, G., Kramer, C., Grundel, M., Neubert, M., Kümpel, S. et al., 2015, „Fortschrittsbericht zur modellbasierten Unterstützung der Konstrukteurstätigkeit durch FAS4M“, Tag des Systems Engineering, Ulm, November 11-13, 2015, Carl Hanser Verlag, München, pp. 69–78
- Weber, C., Krömker, H., Husung, S., Hörold, S., Mahboob, A., Liebal, A., 2016, „Benutzer- und aufgabenorientiertes virtuelles Modell für die Produktentwicklung“, EEE2016 – Konferenz Entwerfen Entwickeln Erleben 2016, Dresden
- Zorriassatine, F., Wykes, C., Parkin, R., Gindy, N., 2005, „A survey of virtual prototyping techniques for mechanical product development“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 217 (4), S. 513–530.

## Kontakt

Atif Mahboob, M. Sc.  
 Prof. Dr.-Ing. Christian Weber  
 Technische Universität Ilmenau  
 Fachgebiet Konstruktionstechnik  
 Max-Planck-Ring 12  
 D-98693 Ilmenau  
<http://www.tu-ilmenau.de/konstruktionstechnik/>

Dr.-Ing. Stephan Husung  
 :em engineering methods AG  
 Rheinstraße 97  
 64295 Darmstadt  
<http://www.em.ag/>

Dipl.-Ing. Andreas Liebal  
 Prof. Dr. Heidi Krömker  
 Technische Universität Ilmenau  
 Fachgebiet Medienproduktion  
 Gustav-Kirchhoff-Straße 1  
 98693 Ilmenau  
<http://www.tu-ilmenau.de/mt-mp/>





# Akzeptanz und Nutzererleben von körpergetragenen Assistenzsystemen im industriellen Anwendungsbereich

Emese Papp und Christian Wölfel

## Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt erlebnisorientierte Aspekte der Entwicklung von körpergetragenen technischen Assistenzsystemen im industriellen Einsatz. Dabei wurde untersucht, wie Akzeptanz für technische Assistenzsysteme entsteht und was die körpernahe Produktinteraktion für das Nutzererleben bedeutet. Neben herkömmlichen Methoden aus der Design- und empirischen Sozialforschung wurden aus der Akzeptanzforschung bekannte Modelle im Hinblick auf Nutzerinteraktion und -erleben untersucht. Die Erkenntnisse können nach Ansicht der Autoren als hilfreicher und allgemein anwendbarer Teil des Entwicklungsprozesses im hoch innovativen technischen Umfeld betrachtet werden.

## Einleitung

Berufsbedingte Erkrankungen des Muskel-Skelett-Systems sind die häufigste Ursache für Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland (Storm 2017) und gehören zu den wichtigsten Gründen für vorzeitige Erwerbsunfähigkeit (Liebers et al. 2013). Dennoch kann in vielen Sektoren nicht auf körperlich anspruchsvolle Arbeit verzichtet werden, da bestimmte Aufgaben aus wirtschaftlichen und technologischen Gründen nicht automatisiert werden können. Überdies hat die Entwicklung der Industrie zu einer Spezialisierung der Arbeitenden und damit zu Erhöhung von repetitiven Tätigkeiten und Leistungsdruck geführt (BAUA 2015). Im Umgang mit Arbeitsmitteln stellt das Hand-Arm-System die wichtigste Schnittstelle dar und ist neben der Wirbelsäule besonders

häufig von Muskel-Skelett-Erkrankungen betroffen. Besonders ersichtlich ist dies in der Automobilmontage, wo der Anteil an manueller Handarbeit bei über 90 % liegt. Dies beinhaltet auch ergonomisch bedenkliche Tätigkeiten, wie repetitive Aufgaben oder Arbeiten in Zwangshaltungen (z. B. Überkopfarbeit), die mit Muskel-Skelett-Erkrankungen eindeutig im Zusammenhang stehen (Lawaczeck 2001). In diesem Zusammenhang gewinnen personenbezogene Präventionsmaßnahmen wie körpergetragene Unterstützungssysteme, Exoskelette (BGHM 2017), immer mehr an Bedeutung. Dieser Sektor ist ein rasant wachsender Markt und sehr vielseitiger Bereich. Im industriellen Feld werden Assistenzsysteme aber erst seit Kurzem eingesetzt und im Mittelpunkt der bisherigen Entwicklungen stand typischerweise die technische Umsetzung, die Bedürfnisse der Nutzer kamen erst an der zweiten Stelle (DGUV 2017).

Im Rahmen eines Forschungsprojektes (2013–2017) haben die Firma Ottobock und der Automobilhersteller Volkswagen gemeinsam mit anderen Partnern ein orthetisch-bionisches Assistenzsystem, das Paexo, entwickelt (Abbildung 1). Dieses System soll muskuloskelettale Erkrankungen, die bei der Überkopfarbeit auftreten können, reduzieren oder vermeiden. Es handelt sich dabei um ein passives System, das ohne zusätzliche Energiezufuhr funktioniert. Um Schulter und Arme zu entlasten, leitet das Assistenzsystem die dort wirkenden Kräfte auf die Hüfte um.



Abbildung 1: Exoskelett Paexo von Ottobock (<https://www.ottobock.com/de/presse/pressemitteilungen/exoskelett-paexo-geht-in-serie.html>)

Die Firma Ottobock hat fast 100 Jahre Erfahrung in der Entwicklung von medizinischen Produkten und kennt damit ihre traditionellen Nutzer, die Patienten, bereits sehr gut. Mit der Entwicklung von Paexo betritt das Unternehmen ein neues Feld und wendet sich neben medizinischen nur auch industriellen Anwendungen zu. Damit verändert sich auch der Anwenderkreis: die Benutzer sind nicht mehr erkrankte oder verletzte Patienten, sondern eine heterogene Gruppe von überwiegend gesunden und in unterschiedlichem Maß erkrankten Arbeitnehmern.

Mithilfe von medizinischen Produkten können Patienten ihren Zustand stabilisieren oder verbessern, damit ist der Nutzenvorteil sehr deutlich. Das Vorhandensein einer Erkrankung oder Verletzung erzeugt also eine klare Nutzungsmotivation und Akzeptanzbereitschaft für medizinische Produkte. Beim industriellen Einsatz von Assistenzsystemen fehlt eine derartige für jeden Nutzer eindeutige Motivation und gut erkennbarer Mehrwert, da die Arbeitnehmer unterschiedliche Einstellungen und Auffassungen zur Prävention haben. Zusätzlich stellt der neue technologische Kontext, der durch die Einführung körpergetragener Assistenzsysteme entsteht, eine besondere Herausforderung für die Nutzerakzeptanz dar.

### **Erleben der Nutzung körpergetragener Assistenzsysteme**

Erfolg und Akzeptanz von Produkten hängen von objektiven und subjektiven Aspekten ab, diese sind die sogenannten instrumentellen (z. B.: Effektivität, Ergonomie, Zuverlässigkeit) und nicht-instrumentellen Qualitäten (z. B.: Ästhetik, Identifikation, Bedeutung, vgl. Thüring & Mahlke 2007). Mit den nicht-instrumentellen Qualitäten und deren emotionales Erleben beschäftigt sich das Konzept des Nutzererlebens (User Experience, UX). Die Relevanz des positiven Erlebens der Arbeitsumwelt wird immer mehr betont, da sich es auf Wohlbefinden, damit auch auf Motivation und Leistungsvermögen auswirkt (Burmester et al., 2015).

In der Verwendung von körpergetragenen Assistenzsystemen gewinnen nicht-instrumentelle Qualitäten noch mehr an Bedeutung, da die Interaktion mit dem Produkt direkt an dem Körper des Nutzers stattfindet und dadurch eine neue substantielle Ebene des Nutzererlebens zur Erscheinung kommt.

Um die Weiterentwicklung und die gestalterische Ausarbeitung des Systems Paexo vorzubereiten, wurde anhand der entwickelten Prototypen in dieser Arbeit intensiv untersucht, wie Akzeptanz für technische Assistenzsysteme entsteht, welche Zusammenhänge zwischen Nutzererleben und Akzeptanz bestehen und welche besondere Aspekte die körpernahe Produktinteraktion mit sich bringt.

## **Aspekte der Akzeptanzentstehung und Nutzererleben**

Als Reaktion auf das entstehende Spannungsfeld aus hoher technologischer Innovation und Nutzerakzeptanz wurden herkömmliche Methoden aus der Design- und empirischen Sozialforschung, wie Beobachtungen im Einsatzfeld, Nutzerbefragungen, Nutzertest, Persona und Designpositionierung verwendet und aus der Akzeptanzforschung bekannte Modelle im Hinblick auf Interaktion und Erleben untersucht. An dieser Stelle werden nur die Begriffe der Technologieakzeptanz, die durchgeführte Nutzerbefragung und die Analyse der Produktsprache vorgestellt.

Akzeptanz bezeichnet eine grundsätzlich positive Einstellung zu einem Akzeptanzobjekt. Akzeptanz ist personengebunden, stets subjektiv, entsteht durch rationale und emotionale Einsicht und beruht auf Freiwilligkeit. (Schäfer & Keppler 2013)

Um den Entstehungsprozess von Akzeptanz zu verstehen, wird an dieser Stelle das Modell des Innovations-Entscheidungsprozesses nach Rogers (Abbildung 2) (Arnold & Klee 2016) angewendet. Der Prozess kann idealtypisch in die Phasen Wissen, Überzeugung, Entscheidung, Implementierung und Bestätigung zerlegt werden. In der ersten Phase „Wissen“ erwirbt das Individuum Kenntnis über eine Innovation und deren Funktionsweise. Dieser Prozess wird dabei von sozioökonomischen Eigenschaften (Bildung, Schulabschluss, etc.), von Persönlichkeitsmerkmalen (Offenheit, Gewissenhaftigkeit, etc.) und von dem Kommunikationsverhalten (interpersonale Kommunikation, Massenmedien, etc.) beeinflusst. Die zweite Phase, „Überzeugung“, führt zu einer positiven oder negativen Einstellung gegenüber der Innovation und resultiert in einer adoptierenden oder ablehnenden Entscheidung. Diese Einstellung hängt von Kriterien ab, wie relativer Vorteil (Nutzenvorteil der Innovation im Vergleich zur Vorgängertechnologie), Kompatibilität (Vereinbarkeit

mit bestehenden Werten, Erfahrungen und Bedarfen), Prüfbarkeit (Möglichkeit, eine Innovation auszuprobieren), Beobachtbarkeit (Grad, mit dem die Ergebnisse der Innovation für andere erkennbar sind) und Komplexität (Schwierigkeit, die Innovation zu verstehen und bedürfnisgerecht zu benutzen). (Arnold & Klee 2016)

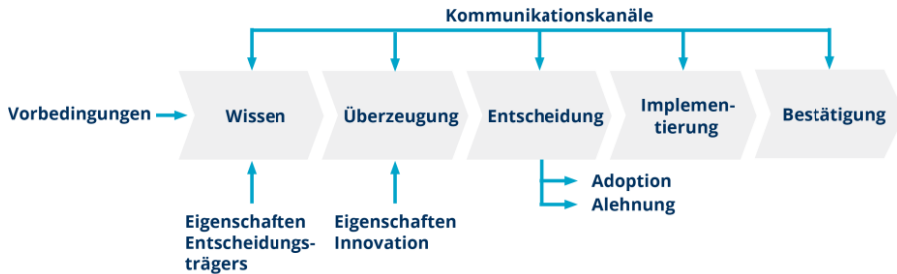


Abbildung 2: Innovations-Entscheidungsprozess nach Rogers (Arnold & Klee 2016)

Besonderheit der Technologieakzeptanz im professionellen Kontext, dass das Akzeptanzsubjekt (Mitarbeiter) das Akzeptanzobjekt (Assistenzsystem) in einem von der Organisation definierten Akzeptanzkontext (freiwillige oder verpflichtende Nutzungskontext) wahrnimmt. Die Akzeptanzeinstellung der Nutzer hängt auch von Unternehmensaufbau und -kultur ab (Meissner & Trübswetter 2018).

Die Akzeptanzforschung hat sich bisher wenig mit dem Level der Interaktion zwischen Nutzer und Produkt beschäftigt, obwohl diese Unterscheidung relevanter Faktor in der Akzeptanzentstehung sein kann. In der Mensch-Roboter-Interaktion werden die folgenden Stufen definiert: *Koexistenz* (Agieren im gleichen Zeit und Arbeitsraum), *Kooperation* (Verfolgung des gleichen Zieles) und *Kollaboration* (direkter Kontakt zwischen den Partnern) (Meissner & Trübswetter 2018). Die Interaktion mit körpergetragenen Assistenzsysteme ist eine besondere Form der Kollaboration, da die Interaktion direkt an dem Körper der Nutzer stattfindet und darauf direkte Auswirkung hat. Um das besondere Ausmaß des Interaktionslevels genauer charakterisieren zu können, wird hier vorgeschlagen den Begriff *Union* zu verwenden. Mit steigender Interaktionsintensität nimmt auch die Rolle des Nutzererlebens auch zu.

Wie diese Erläuterungen zeigen hängt Akzeptanz von vielen Faktoren ab. Vorbedingung wie die Ebene der Organisation und die Eigenschaften der Nutzer

können nicht beeinflusst werden, aber können und müssen in der Entwicklung beachtet werden. Die Eigenschaften der Innovation müssen genau auf die Bedürfnisse der Nutzer abgestimmt werden, um eine adoptierende Entscheidung zu erzielen.

Im Rahmen eines Vor-Pilot-Test im März 2018 im Audi Werk in Győr (Ungarn) haben neun Nutzer (männlich, zwischen 20 und 40 Jahre alt, mit sportlicher Statur) zwei Wochen lang das Paexo unter herkömmlichen Arbeitsbedingungen getragen. Zur Messung des Produkterlebens wurden mit den Probanden ein Leitfadeninterview mit vorab definierten Fragen zur qualitativen Erhebung von Selbstauskünften zu individuellen Bedürfnissen in Bezug zu dem Assistenzsystem im industriellen Einsatz durchgeführt. Anhand der Interviews konnten die für den spezifischen Kontext bedeutenden Bedürfnisse (Hassenzahl et al. 2010 nach Sheldon et al. 2001) ermittelt und genauer beschrieben werden.

*Sicherheit* ist für die Probanden wichtig, wird aber im professionellen Kontext vorausgesetzt. *Autonomie* und *Kompetenz* sind ebenfalls wichtig, aber werden eher auf die Arbeitsumgebung und nicht auf das Assistenzsystem bezogen. *Komfort* als Tragekomfort und auch als Faktor der Effektivität bei der Arbeitsausführung wurde als sehr wichtig eingestuft. *Körperlichkeit* erhielt in diesem Kontext eine weitere Bedeutung: es wurde nicht nur als das momentane Erleben des körperlichen Wohlbefindens, aber wegen der präventiven Charakter des Systems, auch als Konfrontation mit möglichen Erkrankungen und eigenen Schwächen interpretiert und dadurch hängt es auch mit dem Bedürfnis nach *Selbstwert* zusammen: Viele der Probanden gaben ungerne oder gar nicht zu, dass sie bei der Arbeitsausführung Hilfe benötigen.

Aus den Interviews und Beobachtungen ging hervor, dass die Verwendung eines Assistenzsystems einen bedeutenden Einfluss auf das Selbstbild des Nutzers haben kann. Dies erleuchtet die Problematik der der Technologieakzeptanz aus einer neuen Perspektive und unterstreicht die Relevanz von User Experience im professionellem Kontext. Diese Erkenntnisse lassen sich auch in das Modell des Innovation-Entscheidungsprozesses von Rogers integrieren (Abbildung 3).

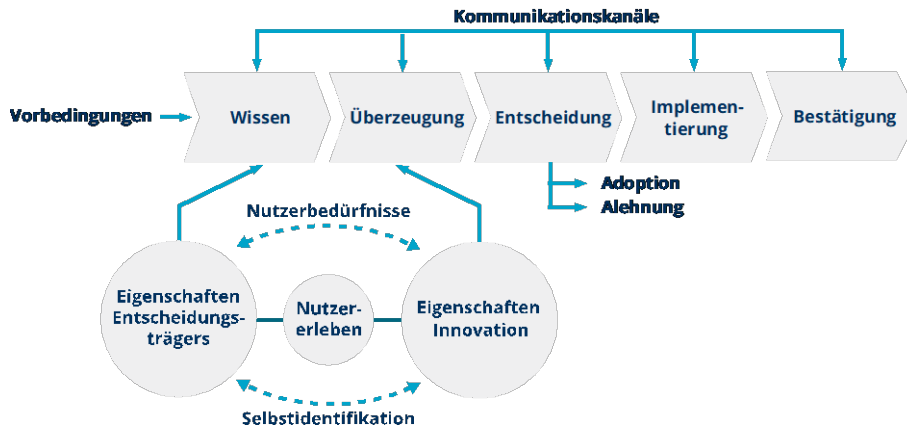


Abbildung 3: Innovation-Entscheidungsprozess bei Assistenzsystemen, nach Rogers (Arnold & Klee 2016)

Die Interviews zeigten die Relevanz der vorhandenen Organisationsstrukturen und Einstellung der Nutzer, aber auch ein deutliches Potenzial zur Verbesserung verschiedener Aspekte des Nutzererlebens.

## Produktsprache als Mittel zur Verbesserung von Nutzererleben und Akzeptanz

Das Erleben einer Innovation wird stark davon beeinflusst, wie deren Eigenschaften kommuniziert werden. Nach dem „Offenbacher Ansatz“ wird die Kommunikation zwischen Nutzer und Produkt als Produktsprache bezeichnet. Die Anzeichenfunktionen der Produktsprache spielen eine elementare Rolle in der Produktnutzung, da diese verantworten:

- die Verständlichkeit der praktischen Funktion und Handhabung des Produktes
- die Identifizierung, Selbsterklärung und die Usability von dem Produkt
- das Kommunizieren von Eigenarten und Produktqualitäten (Steffen 2014).

Dies zeigt, dass die Anzeichenfunktionen den aus dem Modell des Innovations-Entscheidungsprozesses bekannten Begriffen *Relativer Vorteil* und *Komplexität* zugeordnet werden und gestalterische Ansätze umgewandelt werden

können. (z. B.: Das Assistenzsystem Paexo sollte durch seinen Aufbau und seine Gestaltung klar zeigen, dass es am Rücken / Hüfte tragbar ist und es den Nacken-Schulter-Arm-Bereich unterstützt. Im Weiteren muss seine Handhabung und Bedienung den Erwartungen und Vorstellungen (mental Modellen) des Nutzers entsprechen. Dies erfordert eine gründliche Analyse der Schnittstellen, wobei die Gestaltung auf bekannte Äquivalente zurückgreifen soll, um den Umgang mit dem Produkt zu erleichtern.

Für das emotionale Erleben des Produktes sind die Symbolfunktionen der Produktsprache verantwortlich (Abbildung 4). Sie kommunizieren und unterstützen die Identität einer Person (Lifestyle) und / oder eines Unternehmens (Brand) und bestimmen Anmutung und Bedeutung eines Produkts (Steffen 2014). Die präventive Natur und der körpergetragene Charakter eines körpergetragenen Assistenzsystems schaffen einen speziellen Interpretationsraum für die Symbolfunktionen. Die Bedeutungen der Symbole können unmittelbar an den Nutzer des Systems übertragen werden. Wie die Interviews auch gezeigt haben, haben *Körperlichkeit* und *Selbstwert* eine sehr wichtige Rolle in dem Produkterleben und können von den Symbolfunktionen positiv oder negativ beeinflusst werden. Wenn das System an ein Hilfsmittel erinnert, kann der Anwender denken, dass er dadurch schwach oder krank erscheint. Dies könnte zur kompletten Ablehnung des Produktes führen. Dementsprechend müssen die vom System getragenen Anmutungen und Assoziationen eine mögliche *Stigmatisierung* ausschließen und ein positives *Selbstidentifikation* ermöglichen (z. B.: Das System sollte statt eine Orthese an ein Sportgerät erinnern).

## Zusammenfassung und Ausblick

In dem dargestellten Projekt wurden, neben Durchführung von qualitativen Interviews, theoretische Modelle aus der Akzeptanzforschung und aus der Designtheorie analysiert, um besondere Aspekte der Nutzererleben und der Akzeptanz von körpergetragenen Assistenzsystemen beschreiben und mit gestalterischen Mitteln verbessern zu können.

Der assoziative Charakter der Produkt-Identifikation und der Einfluss der Verwendung eines Assistenzsystems auf das Selbstbild des Nutzers erleuchten die Frage der Technologieakzeptanz aus einem neuen Blickwinkel und machen die Relevanz von User Experience im professionellem Kontext deutlich.



Die entstandenen Ergänzungen zum Modell des Innovation-Entscheidungsprozesses sollte jedoch in einer weiterführenden Untersuchung überprüft werden.

Die Interpretation der Ergebnisse erfolgte in der hier nicht dargestellten Weiterentwicklung der Prototypen. Die genannten Aspekte ließen sich in gestalterische Prinzipien umsetzen und lieferten Ansätze zur gestalterischen Ausarbeitung und konstruktiven Umsetzung. In einem iterativen Prototyping-Evaluierungs-Prozess wurde eine neue Produktarchitektur für das Assistenzsystem entwickelt. Anschließend konnten die untersuchten Aspekte des Produkterlebens und technisch-funktionaler Modifikationen des Systems in einem verbesserten Produktentwurf synthetisiert werden.

Eine enge Zusammenarbeit mit ausgewählten Anwendern wäre wünschenswert gewesen, jedoch konnte es im begrenzten zeitlichen Rahmen des Projektes nicht realisiert werden. In weiteren umfassenden Untersuchungen sollte auch das Ausmaß der möglichen Verbesserung der Akzeptanz und Nutzererleben anhand der veränderten Prototypen erlassen werden. Die resultierenden Erkenntnisse können nach Ansicht der Autoren als hilfreicher und allgemein anwendbarer Beitrag zum Entwicklungsprozess im hoch innovativen technischen Umfeld betrachtet werden.

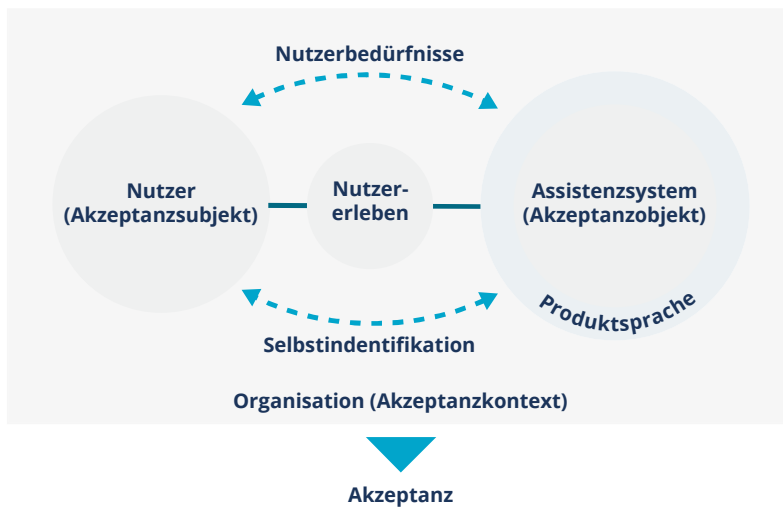


Abbildung 4: Akzeptanzentstehung bei Assistenzsystemen, nach Meissner & Trübswetter (2018)

## Literatur

- Arnold, C.; Klee, C. (2016): Akzeptanz von Produktinnovationen, Springer Gabler, Wiesbaden
- BAUA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2015): Arbeitsbedingungen in der deutschen Automobilindustrie (BIBB/BAuA-2012)
- BGHM, Berufsgenossenschaft Holz und Metall (2017): Einsatz von Exoskeletten an (gewerblichen) Arbeitsplätzen, BGHM Nr. 0059
- Burmester, M.; Zeiner, K.-M.; Laib, M.; Hermosa Perrino, C.; QueBeleit, M.-L. (2015): Experience Design and Positive Design as an alternative to classical human factors approaches. In: Beckmann, C.; Gross, T. (Hrsg.): INTERACT 2015 Adjunct, Bamberg: University of Bamberg Press, S. 153–160
- DGUV, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2017): Einsatz von Exoskeletten an gewerblichen Arbeitsplätzen,
- Hassenzahl, M., Diefenbach, S., Göritz, A. (2010): Needs, affect, and interactive products–Facets of user experience. *Interacting with computers*, 22(5), 353–362.
- Meissner, A.; Trübswetter, A. (2018): Mensch-Roboter-Kollaboration in der Produktion: kritische Würdigung etablierter Technikakzeptanzmodelle und neue Erkenntnisse in der Akzeptanzforschung. In: Weidner, R.; Karafillidis, A. (Hrsg.): Technische Unterstützungssysteme, die die Menschen wirklich wollen, Konferenzband, Hamburg, S. 223–233
- Lawaczek, M. (2001): Zur ergonomischen Beurteilung von Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie. Ergon, Stuttgart
- Liebers, F.; Brendler, C.; Latza, U. (2013): Alters und berufsgruppenabhängige Unterschiede in der Arbeitsunfähigkeit durch häufige Muskel- Skelett Erkrankungen. In Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz, 2013, 56; S. 367–380.
- Schäfer, M.; Keppler, D. (2013): Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung: Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energieeffizienz-Maßnahmen (Discussion paper No. 34), Berlin
- Sheldon, K. M.; Elliot, A. J.; Kim, Y.; Kasser, T. (2001): What is satisfying about satisfying events? *Journal of personality and social psychology*, 80(2), 325.
- Steffen, D. (2014): Design als Produktsprache: Einführung, Vorlesung an der Hochschule Luzern
- Storm, A. (Hrsg.) (2017): Gesundheitsreport 2017; Hamburg, DAK-Gesundheit
- Thüring, M., Mahlke, S. (2007): Usability, aesthetics and emotions in human–technology interaction. In: *International Journal of Psychology* 42 (4), S. 253–264.

## Kontakt

Dipl.-Ing. Emese Papp  
Technische Universität Dresden  
Professur für Technisches Design  
August-Bebel-Straße 20  
01219 Dresden  
*Emese.Papp@tu-dresden.de*

Dr. -Ing. Christian Wölfel  
Technische Universität Dresden  
Professur für Technisches Design  
August-Bebel-Straße 20  
01219 Dresden  
*Christian.Woelfel@tu-dresden.de*



# Modell zur Unterstützung von Designentscheidungen auf strategischer Unternehmensebene im Industrial Design

Frank Thomas Gärtner

Entscheidungen im Industrial Design werden vorrangig auf Basis vorab gestalteter Designentwürfe auf der gehobenen Management- und auf Geschäftsführerebene getroffen. In diesen Unternehmensebenen finden sich nur wenige im gestalterischen Bereich ausgebildete Führungskräfte (Schoenberger 2011). Die Entscheidungen über kreative Bereiche der Produktentwicklung werden daher meist von Personen designferner Disziplinen getroffen. Dieser Umstand beinhaltet zum einen eine große Unsicherheit in Bezug auf die richtige Designentscheidung im unternehmerischen Sinne und zum anderen führt es zu zögerlichen und weniger abgesicherten Entscheidungen bei gestalterischen Fragestellungen. Die Subjektivität, die bei diesen Entscheidungen eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt, erschwert eine sachliche Bewertung und Folgenabschätzung einer Designentscheidung. Diese haben jedoch im weiteren Produktentwicklungsprozess (PEP) und vor allem bei dessen Endergebnis einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Produkts und dessen möglichen Erfolg auf dem Markt. Im klassischen Innovationsmanagement werden die Designkriterien nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. So weist beispielsweise die Innovationscheckliste nach Hauschildt/Salomo kein einziges Designkriterium auf, wenn es um die Bewertung einer möglichen Innovation geht (Hauschildt und Salomo 2011).

## Forschungsansatz

Das Forschungsprojekt hat den Ansatz, durch die frühe Einbindung von Anwenderwissen in den Designprozess, die anfängliche Unsicherheit im Pro-

zess durch eine gezielte Ausrichtung auf die Anwenderbelange schneller abzubauen. Den Designern auf der operativen Ebene und den Entscheidern auf der strategischen Ebene wird ein durchgängiges Hilfsmittel an die Hand gegeben, welches es ermöglicht, frühe Entscheidungen im PEP zu treffen und damit Unsicherheiten bei den Entscheidern auf allen Unternehmensebenen abzubauen.

In der Voruntersuchung wurden 10 Design- und Industrieunternehmen aus dem Maschinenbau mit standardisierten Interviews zum Thema Integration von Anwenderwissen in den strategischen Designprozess befragt. Die Auswertung zeigt einen Bedarf an einem planvollen Vorgehen im Bereich der Erfassung und der Aufbereitung von Anwenderwissen im Designprozess. Eine Mehrheit der Befragten ist der Meinung, dass eine bessere Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Daten ein besseres Ergebnis bei der Produktentwicklung zur Folge haben würde. Gerade die Bewertung von Design und die sich daraus ergebenden Entscheidungen sind schwierig. Wie das Ganze aussehen könnte und wie es in den PEP integriert werden soll, darüber konnte keiner der Befragten Auskunft geben. Dieses Manko wurde aber als wichtiger Punkt mit einem hohen Potential für eine erfolgreiche Produktentwicklung gewertet (Gärtner 2016).

Eine nachfolgend durchgeführte Expertenrunde zum Thema zeigt ein ähnliches Ergebnis. Anwenderwissen von Anfang an in den strategischen Designprozess zu integrieren wurde einstimmig als sinnvoll und notwendig erachtet. Es fehlt jedoch in allen Produktentwicklungsprozessen eine planvolle Vorgehensweise wie und wann dieses Wissen erhoben, aufbereitet und in den Prozess einfließen soll. Ein solches Modell könnte den strategischen Designprozess von Unternehmen stärken und zu besseren Entscheidungsergebnissen führen. Das Modell sollte aus bekannten, einfachen Methoden bestehen, um eine Implementierung in unterschiedliche Produktentwicklungsprozesse zu ermöglichen und die Einarbeitungszeit so kurz wie möglich zu halten (Gärtner 2016).

## **Vorüberlegungen**

Dem auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen basierenden und nachfolgend beschriebenen Modell liegen folgende Vorüberlegungen zugrunde:

Auf der operativen Designebene werden seit mehreren Jahren verschiedene Erhebungsmethoden, welche meist aus dem Bereich der Psychologie stammen, eingesetzt. Diese sind immer weiter an die Belange der Designbranche angepasst worden. Hierzu gibt es zahlreiche Untersuchungen und Studien, wann welche Methode mit welchem Ergebnis angewendet werden kann und wie hoch der dabei entstehende Aufwand ist (Glende 2010; IDEO 2015; Steinhoff 2006; Thüring und Minge 2014). Es bleibt meist der operativen Ebene überlassen, wer untersucht wird und welche Methoden dabei eingesetzt werden. Die Auswahl der geeigneten zu befragenden Personen (Stakeholder) und der Einsatz dieser Methoden ist u.a. vom Wissen und den Erfahrungen der Akteure, dem Umfeld, den wirtschaftlichen Möglichkeiten und vom Faktor Zeit abhängig. Die Voruntersuchungen haben gezeigt, dass das Wissen um die Erhebungsmethoden (primäre Methoden) und der zu befragenden Stakeholder zwar vorhanden ist, die Auswertung und Bewertung der erhobenen Daten aber Schwierigkeiten bereitet. Insofern kann hier nicht von einem zielgerichteten Erheben von Daten zur Bewertung und Entscheidung ausgegangen werden.

Da die Vorbereitung, die Ausführung und die Auswertung der Datenerhebung einen nicht zu vernachlässigen Aufwand bedeutet, ist ein zielgerichtetes Arbeiten sehr wichtig. Demzufolge ist bei diesem Element der Produktentwicklung auch von einer strategischen Bedeutung für das Unternehmen auszugehen.

Die Definition der Ziele, abgeleitet aus den Entscheidungen, die später getroffen werden, ist Teil dieses Modells und bildet den Startpunkt für ein anwenderorientiertes, systematisches Vorgehen im Design technologischer Industriegüter. Auf Basis dieser Ziele können mit einem minimalen Einsatz unterschiedlicher Methoden für das Projekt relevante Daten erhoben und die Anwenderbedürfnisse spezifiziert werden.

Das Modell wird als Vorfilter oder unterstützender Prozessbegleiter im strategischen Design- und Produktentwicklungsprozess eingeführt, um Anwenderbedürfnisse projektfähig zu machen. Es soll prozessunabhängig funktionieren, um eine möglichst breite Anwendung, z.B. in agilen Prozessen oder Stage-Gate-Prozessen zu ermöglichen. Das Modell kann auch zur Aufbereitung der Kundenbedürfnisse für einen vorhandenen Produktentwicklungs-

prozess, z.B. innerhalb einer QFD, verwendet werden. Der Fokus liegt auf designrelevanten Eigenschaften, wie beispielsweise die ästhetische Gesamterscheinung, die Bedienung oder die Semiotik. Ein besonderer Bereich ist die Erweiterung der Methoden durch die Berücksichtigung von psychologischen Grundbedürfnissen nach Diefenbach und Hassenzahl und die sich daraus ergebenden Wirkungen auf den Anwender (Diefenbach et al. 2014; Diefenbach und Hassenzahl 2017; Diefenbach et al. 2014).

## **Generelle Vorgehensweise**

Die Anwenderdaten werden über bekannte primäre Erhebungsmethoden, wie beispielsweise Interviews, Beobachtungen, Incontext Interviews oder Fokusgruppen erhoben, um eine schnelle und einfache Erlernbarkeit zu ermöglichen und den Zeitaufwand überschaubar zu halten. Die erhobenen Daten werden in sekundäre Designmethoden wie Mood-Boards, Kriterienlisten, User Journeys, oder Personas überführt. Das sind bekannte Methoden für das operative Design in Designstudios und sind entsprechend etabliert.

Neu an diesem Modell ist die Weiterentwicklung dieser etablierten Methoden, um sie auch für die strategische Ebene in einem Unternehmen zugänglich zu machen. Das Ziel ist eine ausgearbeitete Entscheidungsempfehlung für die strategische Ebene. Damit soll eine Entscheidungsfindung im Sinne der Anwender unterstützt werden (siehe Abbildung

1).

Durch den Einsatz des Modells kommt man im Bereich einer strategischen Designentscheidung von einer Entscheidung unter Ungewissheit zu einer Entscheidung unter Unsicherheit/Risiko und ermöglicht damit dem Management die Anwendung bekannter Entscheidungsmethoden. Die Anwenderbedürfnisse bleiben bis zur Entscheidung im Projekt und werden Teil einer strategischen Ausrichtung, ohne im Projektverlauf verloren zu gehen. Die projektabschließende Umsetzungskontrolle auch in anwenderspezifischen Bereichen führt mittel- und langfristig zu einer insgesamt besseren Anwenderorientierung des Unternehmens.



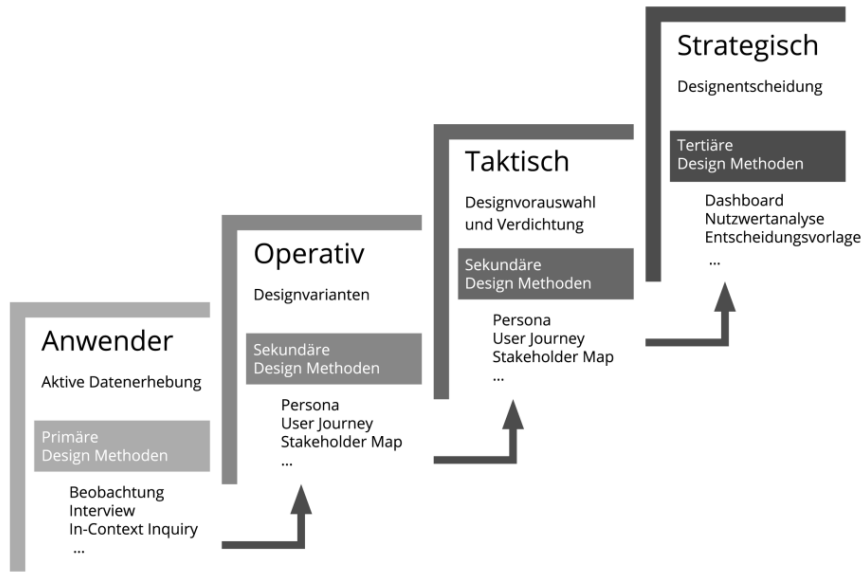


Abbildung 1: Stufenmodell des strategischen Designs, eigene Darstellung, angelehnt an die Design-Leiter des Danish Design Centre (DDC 2015)

## Das Industrial Design KPI-Modell

### Design-Planungsphase

In dieser Phase werden alle relevanten Kriterien, die an das neue Produkt gestellt werden gesammelt und geplant. Es werden keine projektrelevanten Entscheidungen getroffen, jedoch wird hier schon ein Einfluss auf mögliche Entscheidungen genommen, so dass sehr sorgfältig gearbeitet werden muss. In dieser Phase wird festgelegt, wer als Stakeholder im Projekt berücksichtigt wird und mit welchen Methoden eine Anwenderdatenerhebung durchgeführt wird. Die Design-Planungsphase ist Teil des Gesamtprojekt-Planungssystems (Herstatt & Verwon 2007; Thommen et al. 2017) und beinhaltet folgende Komponenten:

- Ausgangslage beschreiben
- Identifikation und Definition der Stakeholder
- Relevante KPI's, Kriterien und Ziele festlegen
- Mittel und Budget für das Design festlegen

- Methodenwahl und Einsatz der Methoden planen
- Prognose der zu erwartenden Ergebnisse
- Auswahl eines Entscheidungs- und Bewertungssystems auf Basis der KPIs

### Anwenderdatenerhebung

Auf Basis der in der Design-Planungsphase gewählte Erhebungsmethoden, wie z.B. 1:1-Interviews, Beobachtung, In-Kontext-Interviews, Fokusgruppen usw. wird die Durchführung dieser Methoden geplant, Inhalte festgelegt und anschließend durchgeführt. Inhaltlich orientieren sich die Methoden an den Erkenntnissen, die aus früheren Entscheidungen und deren Auswirkungen auf vergleichbare Projekte gemacht wurden. Diese Rückkopplung aus früheren Erfahrungen ist wichtig, um die Vorgehensweise zu schärfen. In dieser Phase ist die operative Designebene auf den Input der strategischen Ebene angewiesen (siehe Abbildung 2).

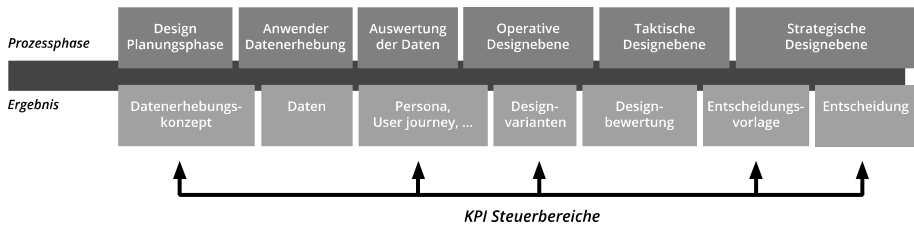


Abbildung 2: Vorläufiges Prozessschaubild des Industrial Design KPI-Modells, eigene Darstellung

### Auswertung der Anwenderdaten

Die gesammelten Daten werden von der operativen Designebene sortiert, gruppiert, verdichtet und ausgewertet. Die Datenaufbereitung ist elementar wichtig für den weiteren Verlauf des Projektes, da hier der Charakter der Stakeholder (Persona) aber auch des Gesamtprojekts (User Journey, Features) definiert wird. In der operativen Ebene werden die ersten Entscheidungen gefällt, welche Kriterien sind wichtig, welche Äußerungen sind Einzelmeinungen mit mehr oder weniger Bezug auf das Gesamtprojekt. Diese Entscheidungen müssen bewusst gefällt werden und sollten mit der strategischen

Ebene in einem Anwenderdaten-Review besprochen werden, bevor die eigentliche Designarbeit mit der Gestaltung von Designvarianten beginnt. In einer agilen Projektumgebung, wie beispielsweise SCRUM, lässt sich diese Projektphase gut als Sprint einbauen, bei eher linearen Stage-Gate-Prozessen muss dieses gesonderte Review fest eingeplant werden.

### Gestalterische Designarbeit auf operativer Ebene

Nach Freigabe der Anwenderdaten und deren Umsetzung in sekundäre Designmethoden, wie Persona, User Journeys usw. beginnt die gestalterische Arbeit der Designer. In dieser Phase gibt es keine Beeinflussung durch die strategische Ebene, um den Kreativprozess nicht zu stören. Falls ein Informationsdefizit festgestellt wird, gehen die Designer direkt auf Stakeholder zu, um weitere Daten zu erheben. Es werden mindestens drei tragfähige Designentwürfe gestaltet, skizziert, visualisiert und laufend mit den sekundären Designmethoden abgeglichen. Auf Basis der Daten und der daraus entstandenen Entwürfe wird für jeden Entwurf eine Designbeschreibung erstellt, die Bezug auf die wichtigsten erhobenen Daten und Erkenntnisse hat. Eine grafische Aufarbeitung kann hier von Vorteil sein. Diese Beschreibung muss neutral formuliert sein und darf keine wertenden Elemente enthalten. Sie sind Grundlage und/oder Bestandteil der Entscheidungsunterlagen für die strategische Ebene.

### Entscheidungsvorbereitung auf taktischer Ebene

Je nach Unternehmensstruktur ist der Designleiter oder der Produkt-/Projektmanager dafür verantwortlich, dass die Aufbereitung der Designentwürfe mit den dazu gehörenden Beschreibungen leicht verständlich, übersichtlich und schnell zu erfassen ist. Sind Elemente der Entwürfe zweideutig oder nicht verständlich, werden diese wieder in das operative Designteam zurückgegeben und der Kreislauf beginnt von neuem. Dieser Regelkreis ist für das Gesamtprojekt wichtig, da er eine Entscheidung auf strategischer Ebene vorbereitet und damit maßgeblich für den weiteren Verlauf des Projekts verantwortlich ist. Eine Ablehnung der Designentwürfe oder eine Nichtentscheidung auf strategischer Ebene führt zu einem größeren Zeitverzug als es diese

Regelschleife, auch bei mehreren Iterationen, benötigt. Bei schlechter Ausführung provoziert man einen Projektabbruch. Insofern ist in dieser Phase ein taktisch kluges Vorgehen elementar für den Erfolg eines Designprojekts.

### Designentscheidung auf strategischer Ebene

Auf Basis der zuvor erarbeiteten Designentwürfe und deren Beschreibungen sind die Entscheidungsunterlagen vorbereitet und müssen durch das strategische Management und die Geschäftsleitung entschieden werden. Diese Entscheidungsprozesse sind gerade in der Industrie durch einen limitierten Zeiteinsatz geprägt, so dass es in dieser Phase nicht mehr möglich ist, ausführliche Diskussionen zu führen. Die Kenntnis des Entscheidungsprozesses ist für alle Projektbeteiligten transparent zu machen und er muss allen bekannt sein, damit dieser durchgeführt werden kann. Welche Entscheidungsinstrumente zum Einsatz kommen muss ebenfalls bekannt sein und diese müssen vollständig vorliegen.

Designentscheidungen sind in der Regel echte Führungsentscheidungen, da diese den weiteren Verlauf des Projekts und auch die Zukunft des Unternehmens betreffen. Zu den sachlichen Argumenten kommen emotionale und subjektive Elemente dazu, kombiniert mit einer unsicheren Datenlage in vielen Bereichen, die diese Entscheidungen betreffen. Eine Entscheidung kann daher nur getroffen werden, wenn die gesamte Sachlage bekannt ist und die Entscheidungsträger auch die entsprechenden Befugnisse haben. Diese Entscheidungen können nicht in Fachabteilungen delegiert werden (Thommen et al. 2017). Darüber hinaus konkurrieren Designthemen mit vielen anderen hoch priorisierten Themen im Unternehmen.

Die Design-Entscheidungsunterlagen müssen deshalb auch folgende übergreifenden Elemente enthalten:

- Welche primären Ziele hat das Designprojekt?
- Wer sind die Stakeholder und wie werden deren Bedürfnisse erfüllt oder unter-/übererfüllt?
- Die mit dem Design verfolgten Unternehmensziele und die Passung zur Marke sowie zum Unternehmensimage müssen klar ersichtlich sein.
- Wie sind der Mittelbedarf, die Verteilung der Mittel und die Wirtschaftlichkeit des Projekts?

Diese Designentscheidungen sind Entscheidungen unter Unsicherheit/Risiko. Dazu gibt es in der Entscheidungstheorie verschiedene Ansätze, wie man damit umgehen kann. Zur Durchführung dieser Entscheidungsansätze sind folgende Punkte wichtig:

- Der Ausarbeitungsgrad der Alternativen, die zur Entscheidung stehen
- Das Umfeld in der die Entscheidung getroffen wird
- Die Risikobereitschaft der Entscheider

Die qualitativ gute Ausarbeitung der Designentwürfe ist daher eines der drei wichtigsten Kriterien für eine gute Entscheidung im Sinne der Anwender des zukünftigen Produkts und des Unternehmens. Das Umfeld der Entscheidung lässt sich durch das Design nur bedingt beeinflussen. So kann eine Designentscheidung der strategischen Unternehmensebene im Rahmen eines kreativen Designumfelds durchaus hilfreich sein. Die Risikobereitschaft der Entscheider ist eine persönliche Einstellung zum Projekt und kann durch eine gute Aufbereitung der Sachlage und vor allem unter Zuhilfenahme bekannter Werkzeuge und Mechanismen positiv verändert werden. An dieser Stelle setzt das hier beschriebene Modell an.

### Einführung von KPIs in das Industrial Design

Key Performance Indicators (KPI) werden seit Jahren für die Steuerung und Überwachung von unternehmerischen Tätigkeiten eingesetzt (pwc 2007). Sie sind somit ein gängiges Instrument zur Unternehmensführung und Beobachtung. Im Bereich der digitalen Medien und deren Optimierung werden ebenfalls sogenannte Experience-KPIs eingesetzt (Jan Pohlmann 2017; Ketil Limani 2018). Das vorliegende Modell erweitert diese etablierte Vorgehensweise um KPI's für das Industrial Design mit dem Fokus auf Anwenderwissen und deren Bedürfnisse unter besonderer Berücksichtigung der unternehmerischen Entscheidungsprozesse.

Auf Basis der Anwenderdaten, den daraus abgeleiteten sekundären Designmethoden und der gestalteten Designvarianten aus dem operativen Bereich werden folgende vorläufigen KPIs für das Industrial Design definiert, welche weiter auf deren Tauglichkeit und Aussagekraft hin untersucht werden:

### Vorläufige qualitative KPIs für das Industrial-Design

- Ästhetische Gesamterscheinung
- Optische und sensorische Qualität
- Bedienung: Grad der Intuition
- Psychologisches Grundbedürfnis 1 der Persona
- Psychologisches Grundbedürfnis 2 der Persona
- Nachhaltigkeit und Materialeinsatz
- Anwenderpassung und Markenfit
- Risikoeinschätzung

### Vorläufige quantitative KPIs für das Industrial-Design

- Designkosten
- Entwicklungsdauer
- Gesamtaufwand

Diese Liste basiert auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen und einer Desktop-Recherche und stellt eine vorläufige Sammlung möglicher relevanter KPIs dar.

### Weiteres Vorgehen

Die Liste soll im Zuge der Hauptuntersuchung um weitere KPI's ergänzt und dann auf diejenigen 5-10 verdichtet werden, die die größte Relevanz für Designentscheidungen enthalten, um die Nutzbarkeit des Modells einfach zu halten.

### Einschränkung des Modells

Mit diesem Modell kann man nicht den möglichen Erfolg eines neuen zukünftigen Produkts messen. Die Entscheidungsprozesse im strategischen Design sollen damit soweit versachlicht werden, dass Entscheidungen nachvollziehbar sind und die Belange der Anwender berücksichtigt werden. Es findet ein Abbau von Subjektivität auf der Entscheiderebene statt und bringt das Design besser in gelebte Entscheidungsprozesse ein. Es findet keine „Versachlichung“ von Emotionen statt und es hat nur geringen Einfluss auf die operative Designarbeit und deren kreative Leistung.

## Literaturverzeichnis

- DDC (2015): Design Ladder. Danish Design Centre. Kopenhagen. Online verfügbar unter <https://danskdesigncenter.dk/en/design-ladder-four-steps-design-use>, zuletzt geprüft am 03.03.2019.
- Diefenbach, Sarah; Hassenzahl, Marc (2017): Psychologie in der nutzerzentrierten Produktgestaltung. Mensch-Technik-Interaktion-Erlebnis. Berlin: Springer (Die Wirtschaftspsychologie).
- Diefenbach, Sarah; Lenz, Eva; Hassenzahl, Marc (2014): Erlebnisorientierte Interaktionsgestaltung Bedürfnisansatz Interaktionsvokabular. Handbuch Tools zur User Experience Gestaltung und Evaluation. Folkwang Universität der Künste, Essen.
- Gärtner, Frank Thomas (2016): Anwenderintegration in strategische Designprozesse von Industriegütern. Beitrag in: Krzywinski, Jens; Linke, Mario; Wölfel, Christian (Hg.) (2016): Entwerfen Entwickeln Erleben 2016. Beiträge zum Industrial Design : Dresden 31. Juni-1. Juli 2016. eee2016. Dresden. Konferenz Entwerfen - Entwickeln - Erleben. Dresden: TUDpress (Technisches Design, 10).
- Glende, Sebastian (2010): Entwicklung eines Konzepts zur nutzergerechten Produktentwicklung – mit Fokus auf die „Generation Plus“. TU Berlin, Berlin. Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, zuletzt geprüft am 03.03.2019.
- Hauschildt, Jürgen; Salomo, Sören (2011): Innovationsmanagement. 5., überarb., erg. und aktual. Aufl. München: Vahlen (Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10602052>.
- Herstatt Cornelius, Verworn, Birgit (2007): Management der frühen Innovationsphasen. Grundlagen – Methoden – Neue Ansätze. 2. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH,
- IDEO (2015): IDEO\_HCD\_ToolKit. 2nd Edition. Hg. v. IDEO.org. Online verfügbar unter <http://www.designkit.org/resources/1>, zuletzt geprüft am 03.03.2019.
- Jan Pohlmann (2017): Metriken und KPIs zur Messung der User Experience. Online verfügbar unter <https://www.usabilityblog.de/metriken-kpi-ux/>, zuletzt aktualisiert am 28.03.2017, zuletzt geprüft am 03.03.2019.
- Keti Limani (2018): 10 Customer experience KPIs. Online verfügbar unter <https://www.zendesk.com/blog/10-customer-experience-kpis/>, zuletzt geprüft am 03.03.2019.
- pwc (2007): Guide to key performance indicators. Communicating the measures that matter\*. Hg. v. pwc. Online verfügbar unter [www.corporatereporting.com](http://www.corporatereporting.com), zuletzt geprüft am 18.12.2018.
- Schoenberger, Johanna (2011): Strategisches Design. Verankerung von Kreativität und Innovation in Unternehmen. Univ. für angewandte Kunst, Diss.--Wien, 2011. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Gabler Research).

- Steinhoff, Fee (2006): Kundenorientierung bei hochgradigen Innovationen. 1. Aufl. s.l.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag (Betriebswirtschaftslehre für Technologie und Innovation, v.57).
- Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk Ulrich; Hachmeister, Dirk; Kaiser, Gernot (Hg.) (2017): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre // Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Gabler (Lehrbuch, / Jean-Paul Thommen, Ann-Kristin Achleitner ; Hauptband).
- Thüring, Manfred; Minge, Michael (2014): Nutzererleben messen - geht das überhaupt? In: *Mittelstand-Digital WISSEN*(1), 47-55, zuletzt geprüft am 24.07.2018.

## **Kontakt**

Prof. Dipl.-Ing. Designer Frank Thomas Gärtner  
Hochschule Aalen  
Beethovenstraße 1  
73430 Aalen  
[www.hs-aalen.de/de/users/742](http://www.hs-aalen.de/de/users/742)



# Der Einfluss stilistischer Merkmale einer Entwurfsvisualisierung auf die semantischen Produkteigenschaften

Frank Mühlbauer

## 1 Einleitung

Aufgrund der Komplexität und den hohen Anforderungen an technische Produkte im professionellen Nutzungskontext entstehen deren Entwürfe nicht losgelöst von parallel laufenden Entwicklungsprozessen, sondern in der Regel eng verzahnt im interdisziplinären Umfeld mit fachübergreifenden Entwicklerteams. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit ist es essenziell, zielgerichtet Arbeitsunterlagen beispielsweise für Entscheidungsprozesse zu erzeugen. Für Visualisierungen aus Designprozessen, zur Repräsentation des Entwurfsgegenstandes bedeutet das, dass ihre Eigenschaften dem angestrebten Zweck entsprechend abgestimmt sein sollten.

Im Entwurfsprozess werden neben den quantitativen auch die qualitativen Produktanforderungen berücksichtigt, die sich u. a. in der Produktgestaltung widerspiegeln sollen (Heufler, 2012). Die resultierende Formgebung kommuniziert neben funktionalen auch maßgeblich die semantischen Produkteigenschaften. Die Erzeugung von Entwurfsvisualisierungen folgt in der Regel keinem einheitlichen Vorgehen, sondern erfolgt sehr individuell auf der Grundlage von Erfahrungen und dem bevorzugten Werkzeug-Einsatz des Entwerfenden. Die Wahl des Werkzeugs ist demzufolge häufig nicht auf die Funktion oder den angestrebten Zweck der Visualisierung abgestimmt (Goos & Zang, 2009). Dabei sind die Visualisierungen für Kommunikations- und Entscheidungsprozesse mit anderen Fachdisziplinen essenziell und dementsprechend müssen die zu beurteilenden Aspekte präzise dargestellt sein

(Chen, You, & Lee, 2003). Zweckgerecht und angemessen können Designvisualisierungen beispielsweise inspirierend oder motivierend wirken und den Austausch anregen. Unangemessen und falsch eingesetzt sind sie irreführend und vermitteln ein unklares Bild vom Entwurfsstand, was zu Zielkonflikten in der Bewertung von Produktkonzepten zwischen Entwerfenden und Entscheidern führen kann. Demzufolge ist ein wesentliches Ziel der Arbeit zu untersuchen, inwieweit die Art der Visualisierung, grafische Merkmale und Merkmalsausprägungen einen Einfluss auf die Beurteilung des Entwurfsgegenstands haben.

## **2 Entwurfsvisualisierungen und die Vermittlung semantischer Produkteigenschaften**

Während des gesamten Produktdesignprozesses, von der Ideengenerierung bis zur Produktumsetzung, werden unterschiedliche Arten an Darstellungsmitteln zur Repräsentation des Entwurfsgegenstandes verwendet. Dazu zählen beispielsweise Skizzen, Renderings, Arbeitsmodelle, Prototypen, physische und virtuelle Mock-Ups (Artacho-Ramírez et al., 2008). Die visuellen Darstellungsmittel sind für Entwerfende ein zentrales Werkzeug im Designprozess und werden für verschiedene Zwecke und Anforderungen verwendet – von der schnell gezeichneten Denkskizze bis hin zu überzeugenden Renderings und digitalen CAD-Modellen (Pei et al., 2011). Sie dienen gleichermaßen zur Reflexion der eigenen Arbeitsschritte und helfen die Design-Intentionen anderen Stakeholdern im Entwicklungsprozess zu vermitteln.

Es existieren eine Reihe von Taxonomien und Klassifikationen, um die unterschiedlichen Darstellungsarten im Entwurfsprozess nach Eigenschaften, Funktion und Verwendung zu strukturieren und zu verstehen (Pei et al., 2011), (Kudrowitz et al., 2012), (Self, 2016). Das Klassifikationsschema von Pei mit der Strukturierung und Auflistung einer Vielzahl an zwei- und dreidimensionalen Entwurfsrepräsentationen hat das Ziel, das Verständnis für die unterschiedlichen Arbeitsunterlagen zwischen Design- und Konstruktionsabteilungen zu steigern und im Ergebnis die Zusammenarbeit zu verbessern.

Nach der Ideenfindung, in der vorrangig schnelle Skizzen zur Gedankenexternalisierung erzeugt werden, erfolgt die Ausarbeitung konkreter Designkonzepte. Bei der Erarbeitung initialer Designkonzepte kommen eine ganze Reihe von Darstellungsmitteln zum Einsatz. Der Genauigkeitsgrad

kann dabei zwischen den 2D-Skizzen, 3D-Prototypen und digitalen Modellen – von groben Darstellungen bis hin zu realistischen Renderings – stark variieren (siehe Abbildung 1). Die Entwurfswerkzeuge für die Erzeugung derartiger Darstellungen besitzen spezifische Eigenschaften und Einschränkungen. Das kann dazu führen, dass ein Designkonzept in Abhängigkeit des Werkzeugs, mit dem es entwickelt wurde, zu unterschiedlichen Entwürfen führt und am Ende möglicherweise Beurteilungsunterschiede auftreten (Häggman et al., 2015).



Abbildung 1: 2D-Darstellungsmittel eines Motorrollers (Skizze, Sketch-Rendering, CAD-Rendering)

In der Produktkonzeption eines Entwurfsprozesses werden die Schlüsselmerkmale der Designintentionen, die initialen Ansätze aus der Ideengenerierung und Nutzeranforderungen zu Konzeptvisualisierungen synthetisiert. Dabei spiegeln sich in der Formgebung des Produktkonzeptes u. a. die zentralen semantischen Entwurfs Eigenschaften wie beispielsweise der Produktcharakter oder die Produkthanmutung wider. Die Produktsemantik beinhaltet verkürzt, inwiefern Formen von Gegenständen (Syntax) wahrgenommen werden und welche Bedeutung sie dem Betrachter vermitteln (Krippendorff, 1986). Die Festlegung und Vermittlung semantischer Produkteigenschaften erfolgt bereits in frühen Entwurfsphasen häufig durch sogenannte Mood Boards. Diese Visualisierungstechnik geht weit über die verbale Beschreibung eines Designbriefings hinaus und kommuniziert die angestrebten Eigenschaften des Produktcharakters. In den Collagen werden Bild- und Wortmarken zur Beschreibung der weichen Entwurfsziele beispielsweise aus dem späteren Produktnutzungskontext, den Nutzererwartungen und der formalen Produkthanmutung zusammengestellt. Gerade innerhalb heterogener interdisziplinärer Entwicklerteams ist diese visuelle Methode zur Vermittlung der semantischen Produkteigenschaften für das gemeinsame Verständnis

hilfreich (Bürdek, 2015). Die zentralen formal-ästhetischen Produktanforderungen werden innerhalb einer Konzeptvisualisierung vom Entwerfenden aufgegriffen und spiegeln sich u. a. in einer konkreten Produktform wider. Ein wesentlicher Zweck einer Konzeptvisualisierung ist demzufolge die Vermittlung der angestrebten semantischen Produkteigenschaften beispielsweise innerhalb von Konzeptevaluierungen durch Stakeholder im Rahmen von Entscheidungsprozessen. Die Wahl der Visualisierungsmittel ist häufig jedoch nicht auf die Funktion oder den angestrebten Zweck der Visualisierung abgestimmt (Goos & Zang, 2009). Vielmehr spielt das Zeigen des eigenen Könnens und Leistungsniveaus in der Visualisierung beim Entwerfenden eine Rolle, anstatt die eigentliche Absicht oder Funktion zu vermitteln (Barbarash, 2016). Dies kann zu Zielkonflikten in der Bewertung von Produktkonzepten zwischen Entwerfenden und Entscheidern führen. Weiterhin beeinflusst die Wahl des Designwerkzeugs maßgeblich die benötigten Ressourcen zur Erzeugung der Designdarstellungen. Je höher die Genauigkeit bzw. der Realismus der Darstellung sein soll, desto mehr Geschick und Zeit wird benötigt, um sie zu erstellen. Sehr genaue, detaillierte Darstellungen erfordern in der Regel zusätzliche Entscheidungen über Entwurfsdetails des Entwerfenden, um das gewünschte Maß an Darstellungstreue zu erreichen (Häggman et al., 2015).

Es lässt sich also feststellen, dass Entwurfsvisualisierungen oftmals nicht systematisch, entsprechend ihrem Zweck und die Visualisierungswerkzeuge häufig nach den individuellen Fähigkeiten des Entwerfenden ausgewählt werden. Zudem ist nicht hinreichend untersucht, welche Wirkung Visualisierungsarten, Visualisierungsmerkmale und die grafischen Merkmalsausprägungen beispielsweise auf die Beurteilung semantischer Produkteigenschaften haben. Für eine zielgerichtete Konzeptbewertung hinsichtlich der Beurteilung semantischer Produkteigenschaften ist es jedoch unerlässlich, diesem Zweck entsprechende, präzise Visualisierungen zu erzeugen. Dazu muss zunächst untersucht werden, welche Visualisierungseigenschaften bei der Beurteilung eine Rolle spielen könnten und welchen Effekt dabei die unterschiedlichen Merkmalsausprägungen haben.

### 3 Ziele und Fragestellung

Systematische Untersuchung zum Aufbau und zu den Bestandteilen (grafische Merkmale) einer Konzeptvisualisierung

Zunächst wurden unterschiedliche Konzeptdarstellungen aus drei verschiedenen Entwurfsprozessen technischer Investitionsgüter hinsichtlich ihres Aufbaus untersucht. Aus den einzelnen Arbeitsschritten der Visualisierungen konnten die zentralen grafischen Merkmale bzw. die wesentlichen Bestandteile ermittelt werden. Das Ergebnis lieferte die Struktur einer gängigen Konzeptvisualisierung. Die Grundlage (Basis) bildet dabei eine händische Skizze einer perspektivischen Entwurfsansicht. In aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten werden der Skizze u. a. durch Flächenfüllungen, Abwedler-, Nachbelichtungswerkzeuge und Konturierung der Entwurfsvisualisierung wichtige Geometrie-, Material- und Oberflächeninformationen hinzugefügt. Die Arbeitsschritte „Konturen“, „Flächenfüllung“ und „Abwedeln-Nachbelichten“ konnten im Ergebnis für die Art der Darstellung als zentrale Einflussfaktoren ermittelt werden. In Abbildung 2 ist der Visualisierungsaufbau eines Interieurkonzeptes einer Baggerkabine zur Veranschaulichung dargestellt.

Systematische Untersuchung zur Exploration des Einflusses konkreter Visualisierungsmerkmale auf die Wahrnehmung semantischer Eigenschaften.

Als globale Einflussfaktoren wurden die Art der Darstellung und die Konturen in jeweils unterschiedlichen Merkmalsausprägungen gewählt. Zudem lagen unterschiedliche syntaktische Varianten eines Probekörpers zugrunde, um herauszufinden, ob die Effekte formunabhängig auftreten. Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss grafischer Eigenschaften und die Art der Darstellung auf die Wahrnehmung semantischer Produkteigenschaften zu ermitteln.

#### Hypothesen

##### *H1 Syntaktischer Einfluss auf die semantische Produktwahrnehmung*

- Die Produktgestalt hat einen erheblichen Einfluss auf (beeinflusst, ändert, ...) die wahrgenommenen semantischen Eigenschaften eines Produktentwurfes in einer Entwurfsvisualisierung.

- Die Syntax ist zwar kein stilistisches Merkmal, jedoch dienen die unterschiedlichen Formen des Probekörpers dazu, um herauszufinden, ob formabhängige Unterschiede auftreten

## *H2 Der Einfluss der Visualisierungsart auf die semantische Produktwahrnehmung*

- Die Art der Darstellung hat einen erheblichen Einfluss auf die wahrgenommenen semantischen Eigenschaften eines Produktentwurfes in einer Entwurfsvisualisierung.

## *H3 Der Einfluss von Konturen in einer Entwurfsvisualisierung auf die semantische Produktwahrnehmung*

- Die Konturausprägung hat einen erheblichen Einfluss auf die wahrgenommenen semantischen Eigenschaften eines Produktentwurfes in einer Entwurfsvisualisierung.
- Die Merkmalsausprägungen der Konturen bewirken Wahrnehmungsunterschiede bei den syntaktischen Ausprägungen des Probekörpers (Interaktion).

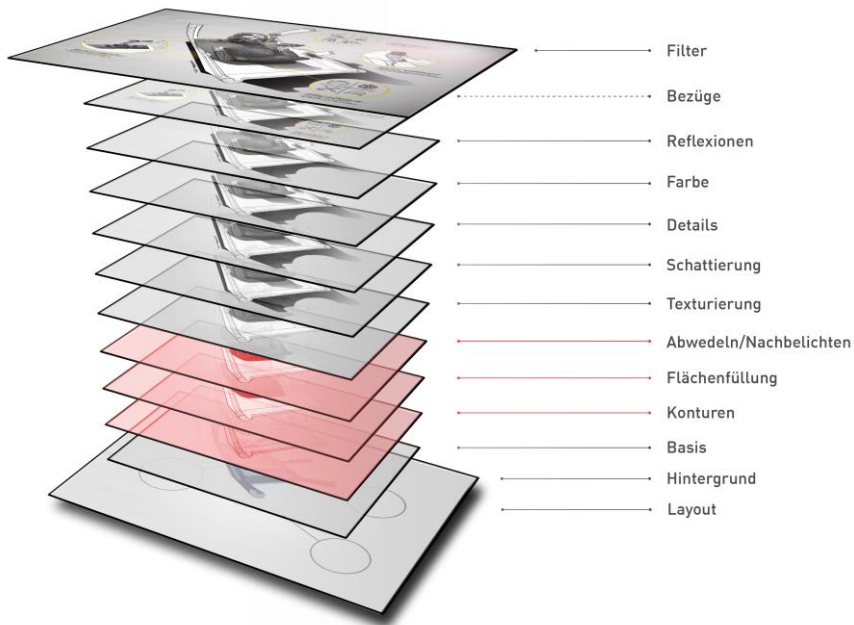


Abbildung 2: schematischer Aufbau zu den Bestandteilen einer Konzeptvisualisierung

## 4 Erhebung

Im Rahmen der Studie wurde der Einfluss unterschiedlicher Visualisierungseigenschaften auf die Wahrnehmung semantischer Produkteigenschaften von Probekörpern erhoben. Zur Erzeugung und Durchführung der Studie wurde die browserbasierte Befragungssoftware Unipark der Firma Questback genutzt. Um einerseits eine hohe Rücklaufquote und andererseits die benötigte Anzahl an Teilnehmern zu erreichen, wurden mehrheitlich Studierende über eine E-Mail mit einem Online-Link zur Umfrage eingeladen. Die Bekanntgabe und Einladung zur Teilnahme erfolgte innerhalb von Lehrveranstaltungen des Allgemeinen konstruktiven Maschinenbaus an der TU Dresden sowie innerhalb von Lehrveranstaltungen der Produktdesignstudiengänge an den Fachhochschulen Aalen, Pforzheim und Aachen. Der Versuchsaufbau bestand aus drei Hauptteilen: Instruktionen, die Befragung zur Einschätzung semantischer Produkteigenschaften und persönliche Angaben. Die Instruktionen beinhalteten den Zweck der Untersuchung, Angaben zur Freiwilligkeit und Datenschutz sowie den Aufbau des Fragebogens. Am Ende gab es einen Fragenkomplex zu demografischen Daten. Um die Beeinflussung durch die Reihenfolge zu reduzieren, wurden die Items randomisiert, also in zufälliger Reihenfolge dargeboten.

Das Stimulusmaterial beinhaltete 45 Testbilder eines Probekörpers, der in verschiedenen Ausprägungen visualisiert war. Einer Gruppe von Versuchspersonen ( $n=100$ ) wurde jeweils neun Testbilder per Zufall (randomisiert) präsentiert. Die Beurteilung der semantischen Eigenschaften erfolgte durch ein semantisches Differenzial aus 25 gegensätzlichen (bipolaren) Adjektivpaaren. Nach Betrachtung des Testbilds war der Proband dazu aufgefordert, den Ausprägungsgrad jedes Adjektivpaars über eine siebenstufige Ratingskala einzuschätzen.

Als Erhebungsmethode zur Evaluierung der semantischen Produkteigenschaften wurde ein semantisches Differenzial angewendet. Dazu mussten zunächst 25 bipolare Wortpaare als abhängige Variablen zusammengestellt werden, die in einer siebenstufigen Ratingskala zur semantischen Bewertung der Probekörper vorlagen (Döring & Bortz, 2016). Die Auswahl der Adjektivpaare erfolgte im Rahmen eines Expertenworkshops in Anlehnung an das Vorgehen zur Entwicklung des Interaktionsvokabulars nach Diefenbach (Diefenbach et al., 2010).

Im Zuge der Erarbeitung des Stimulusmaterials sind drei Formvarianten (syntaktische Merkmalsausprägungen) eines Probekörpers erarbeitet worden (siehe Abbildung 3). Die Vorgehensweise zur Formfindung orientierte sich dabei an den „Step-by-Step Approach“ nach Corremans (2008) bzw. Wölfel & Thoring (2013).



Abbildung 3: syntaktische Formvarianten eines Probekörpers

Die unabhängige Variable *Stil* liegt ebenfalls in drei Ausprägungen vor. Die Art der Visualisierungen unterscheidet sich durch das jeweils zugrundeliegende Werkzeug und das Vorgehen bei der Erzeugung der Visualisierung. Ziel war u. a. die Umsetzung unterschiedlicher Arten des Realismus – von nicht-fotorealistisch bis fotorealistisch (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: stilistische Merkmalsausprägungen eines Probekörpers

Die unabhängige Variable *Kontur* liegt in vier Ausprägungen (bzw. fünf, wenn man Testbilder ohne Konturvorhebung einbezieht) vor (siehe Abbildung 5).



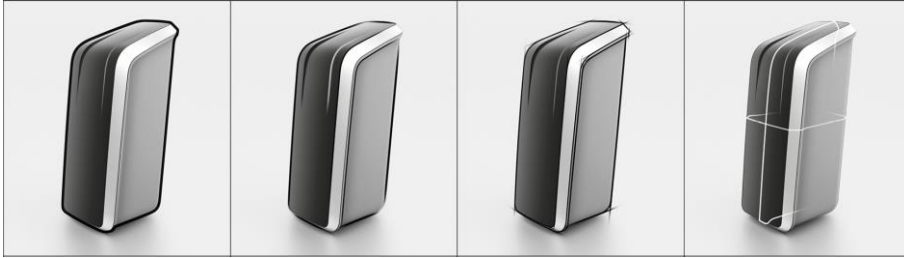


Abbildung 5: Konturausprägungen eines Probekörpers

Im Versuch wurden demnach folgende Faktoren in den Testbildern variiert:

- *Syntax* ( $v_{syn}$ ) in den drei Merkmalsausprägungen „rund“, „eckig“, „neutral“
- *Stil* ( $v_{stil}$ ) in den Merkmalsausprägungen „Sketch Rendering“, „CAD Rendering“, „Illustration“
- *Kontur* ( $v_{kon}$ ) in den fünf Merkmalsausprägungen „keine Kontur“, „geschlossene Outline“, „dynamisch verkürzt“, „dynamisch verlängert“ und „Schnittkontur“

Die ausgewertete Stichprobe umfasste  $N=100$ , darunter 28 weibliche und 72 männliche Versuchspersonen. Bei der Altersverteilung bilden die 18 bis 24-jährigen mit einem Anteil von 60 % die größte Gruppe. 33 % der Teilnehmer/innen waren zwischen 25 und 34 Jahre alt. Drei Prozent waren 35 bis 44 Jahre und vier Prozent 45 bis 59 Jahre alt.

Die Stichprobe bestand aus Studierenden verschiedener Fachrichtungen und aus Berufstätigen. Die Teilnehmer/innen sind aus unterschiedlichen Fachgebieten, dabei mehrheitlich aus dem Kontext der Produktentwicklung.

## 5 Ergebnisse

Zu Beginn der Auswertung wurde eine Faktorenanalyse der 25 abhängigen Variablen durchgeführt. In dem Verfahren werden Zusammenhänge zwischen vielen Variablen berechnet, um die Anzahl vieler korrelierender Variablen auf wenige zu reduzieren (Klopp, 2010). Das Ergebnis ergab vier Faktoren, die mit den Begriffen *Feinfühligkeit*, *Genauigkeit*, *Interaktion* und *Klarheit* überschrieben wurden. Danach wurden die Bewertungsunterschiede der Stichproben für die im Onlinefragebogen präsentierten Testbilder der Probekörper mittels multivariater Varianzanalyse mit den Hauptfaktoren Syntax,

Stil und Kontur berichtet. Die Bedeutsamkeit der Unterschiede zwischen einzelnen Merkmalsausprägungen wurden mittels Scheffé Post Hoc Tests geprüft. Unterschiede werden als signifikant bezeichnet, sofern eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $< 5\%$  vorliegt ( $p < .05$ ).

### Multivariate Tests

Die dreifaktorielle Varianzanalyse ergab hoch signifikante Haupteffekte für das Merkmal *Syntax*:  $F(8) = 55.46$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2 = .208$ , für das Merkmal *Stil*:  $F(8) = 9.68$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2 = .044$  und für das Merkmal *Kontur*:  $F(16) = 5.28$ ;  $p < .001$ ;  $\eta^2 = .024$ . Nach Cohen (Cohen, 1988) ist der Effekt für die Variable *Syntax* ( $\eta^2 = .208$ ) als groß, bei den Variablen *Stil* und *Kontur* ( $\eta^2 = .044$ ,  $\eta^2 = .024$ ) hingegen, sind die Effekte als klein einzustufen. Interaktionen (Wechselwirkungen) zwischen den Faktoren *Syntax*, *Stil* und *Kontur* waren nicht zu verzeichnen. Die gefundenen Haupteffekte sind für die Gesamtheit der Faktoren und Merkmale hypothesenkonform. Erwartete Interaktionen waren jedoch nicht zu verzeichnen. Die signifikanten Haupteffekte der multivariaten Tests zeigen, dass sich die Beurteilungsunterschiede auf die Faktoren *Syntax*, *Stil* und *Kontur* zurückführen lassen.

### Post Hoc Test (Scheffé)

#### Faktor Feinfühligkeit

Testbilder mit der Ausprägung *Sketch Rendering* ( $MW = 3.41$ ,  $SD = .94$ ,  $N = 300$ ) wurden hoch signifikant feinfühlicher beurteilt als Testbilder mit der Ausprägung *CAD Rendering* ( $MW = 3.61$ ,  $SD = .89$ ,  $N = 297$ ) und sehr signifikant feinfühlicher als Testbilder mit der Ausprägung *Illustration* ( $MW = 3.69$ ,  $SD = .86$ ,  $N = 296$ ). Die Teilnehmenden beurteilten Testbilder mit einer *Schnittkontur* ( $MW = 3.33$ ,  $SD = .87$ ,  $N = 174$ ) hoch signifikant feinfühlicher ein als Testbilder mit einer *Outline* ( $MW = 3.72$ ,  $SD = .92$ ,  $N = 188$ ) und Testbilder mit einer *dynamisch verlängerten* Kontur ( $MW = 3.65$ ,  $SD = .88$ ,  $N = 190$ ). Signifikant weniger feinfühlig wurden Testbilder *ohne Kontur* ( $MW = 3.59$ ,  $SD = .94$ ,  $N = 181$ ) gegenüber Testbildern mit einer *Schnittkontur* beurteilt. Des Weiteren konnten signifikante Unterschiede zwischen Testbildern mit Outline gegenüber Testbildern mit *dynamisch verkürzten* Konturen ( $MW = 3.52$ ,  $SD = .89$ ,  $N = 160$ ) ermittelt werden. Letztere sind im Vergleich feinfühlicher eingeschätzt worden.

## Faktor Genauigkeit

Bei der Variable *Stil* wurden hoch signifikante Unterschiede zwischen den Testbildern mit der Ausprägung *Sketch Rendering* gegenüber der Ausprägung *Illustration* und zwischen Testbildern mit der Ausprägung *Illustration* gegenüber der Ausprägung *CAD-Rendering* gefunden. Demzufolge wurden die Bilder mit *Sketch Rendering* (MW = 4.09, SD = 1.22, N = 300) hoch signifikant genauer eingeschätzt gegenüber Bildern mit *Illustration* (MW = 4.5, SD = 1.26, N = 296). Beim Vergleich zwischen der Ausprägung *Illustration* und *CAD-Rendering* konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden. So wurden die Testbilder mit der Ausprägung *CAD-Rendering* (MW = 4.03, SD = 1.23, N = 297) hoch signifikant genauer beurteilt als Testbilder mit der Ausprägung *Illustration*.

Die Probanden beurteilten Testbilder *ohne Kontur* (MW = 3.86, SD = 1.28, N = 181) hoch signifikant genauer als Testbilder mit *dynamisch verlängerten Konturen* (MW = 4.50, SD = 1.21, N = 190). Des Weiteren wurden Testbilder mit einer *Outline* (MW = 4.32, SD = 1.24, N = 188) signifikant ungenauer beurteilt als Testbilder *ohne Kontur*. Auf Testbilder mit *Schnittkontur* (MW = 4.31, SD = 1.27, N = 174) wurde ein ähnlicher Effekt beobachtet. Sie wurden ebenfalls signifikant ungenauer beurteilt als Testbilder *ohne Kontur*.

## Faktor Interaktion

Für das Merkmal *Stil* konnte beim Post-Hoc Test für den Faktor „Interaktion“ ein hoch signifikanter Effekt beobachtet werden. Demnach wurden Testbilder mit der Ausprägung *CAD-Rendering* (MW = 4.80, SD = 1.14, N = 297) höchst signifikant interaktiver eingeschätzt als Testbilder mit der Ausprägung *Illustration* (MW = 4.41, SD = 1.02, N = 296). Testbilder mit der Ausprägung *Illustration* wurden zudem signifikant weniger feinfühlig beurteilt als Testbilder mit der Ausprägung *Sketch Rendering* (MW = 4.65, SD = 1.01, N = 300).

Die Probanden beurteilten Testbilder mit einer *Schnittkontur* (MW = 4.99, SD = 1.11, N = 174) hoch signifikant interaktiver ein als Testbilder *ohne Kontur* (MW = 4.43, SD = 1.06, N = 181) und Testbilder mit einer *Outline* (MW = 4.38, SD = 0.98, N = 188). Weiterhin wurden die Testbilder mit einer *Schnittkontur* signifikant interaktiver beurteilt als Testbilder mit *dynamisch verlängerten Konturen* (MW = 4.64, SD = 1.06, N = 190).

## Faktor Klarheit

Die Probanden beurteilten Testbilder *ohne* Kontur (MW = 5.11, SD = 1.04, N = 181) hoch signifikant klarer als Testbilder mit einer *Schnittkontur* (MW = 4.59, SD = 1.06, N = 174). Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass Testbilder mit einer *Outline* (MW = 5.16, SD = 1.00, N = 188) hoch signifikant klarer beurteilt wurden als Testbilder mit einer *Schnittkontur*. Sehr signifikant klarer wurden Testbilder mit *dynamisch verkürzten* Konturen (MW = 5.03, SD = 1.02, N = 160) gegenüber Testbildern mit einer *Schnittkontur* beurteilt. Weiterhin wurden Testbilder mit *dynamisch verlängerten* Konturen (MW = 4.97, SD = 1.02, N = 190) signifikant klarer eingeschätzt als Testbilder mit einer *Schnittkontur*.

## 6 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Visualisierungsstile als auch die Konturen in verschiedenen Ausprägungen einer Entwurfsvisualisierung signifikante Unterschiede auf die wahrgenommenen semantischen Produkteigenschaften bewirken. Gründe für die z. T. kleinen Effektstärken können beispielsweise die relativ hohe Anzahl an zu evaluierenden Testbildern mit jeweils 25 Items pro Durchgang oder die geringen Unterschiede zwischen den jeweiligen Merkmalsausprägungen sein. Der letzte Punkt wird sehr deutlich, wenn man die 45 Testbilder in einer Übersicht zusammenstellt. Die fein abgestuften, kleinen Unterschiede der grafischen Eigenschaften in den Testbildern waren vor der Erhebung bekannt und eine bewusste Entscheidung für die Verwendung, um festzustellen, ob es bereits in dieser großen Detailtiefe zu deutlichen Wahrnehmungsunterschieden kommt. Zwar konnte beispielsweise nicht bei allen Konturausprägungen ein Effekt beobachtet werden, jedoch wurde deutlich, dass beispielsweise die Schnittkonturen eine besondere Rolle spielen, da sie bei allen signifikanten Ergebnissen der Post-Hoc-Tests involviert waren. Dies kann daran liegen, dass sich die Schnittkonturen von den anderen Konturausprägungen aufgrund der Farbigkeit und der Art der Umsetzung stärker hervorgehoben haben. Die beobachteten Effekte bei den Visualisierungsarten (CAD-Rendering, Sketch-Rendering und Illustration) waren hypothesenkonform und untermauern die Erkenntnisse beispielsweise hinsichtlich der Verwendung. Nach Abschluss der Forschungsarbeit sollen die Erkenntnisse zur Wirkung grafischer Eigenschaften

auf die semantischen Produkteigenschaften beispielsweise in der Designausbildung helfen, den Studierenden eine zielgerichtete und zweckorientierte Vorgehensweise für die Erzeugung von Konzeptvisualisierungen zu vermitteln.

## Literaturverzeichnis

- Artacho-Ramírez, M. A., Diego-Mas, J. A., & Alcaide-Marzal, J. (2008). Influence of the mode of graphical representation on the perception of product aesthetic and emotional features: An exploratory study. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(11–12), 942–952.
- Barbarash, D. (2016). Representation stigma: Perceptions of tools and processes for design graphics. *Frontiers of Architectural Research*, 5(4), 477–488.
- Bürdek, B. E. ; (2015). *Design / Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung*. Basel: Birkhäuser.
- Chen, H.-H., You, M., & Lee, C.-F. (2003). The sketch in industrial design process. Paper presented at the futureground 6th Asian Design Conference.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis. for the Behavioral Sciences*. 2nd. Hillsdale, N.J: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Corremans, J. (2008). Basic skills in the study of form - generating different styling proposals based on variations in surface orientation. International conference on engineering and product design education 4 & 5 September 2008, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Diefenbach, S., Hassenzahl, M., Kloeckner, K., Nass, C., & Maier, A. (2010). Ein Interaktionsvokabular: Dimensionen zur Beschreibung der Ästhetik von Interaktion. In H.Brau, S. Diefenbach, K. Göring, M. Peissner, und K. Petrovic (Hrsg.) *Usability Professionals 2010*, pp. 22–32, Stuttgart, 2010. German Chapter der UsabilityProfessionals' Association e.V.
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage). Berlin Heidelberg: Springer.
- Goos, D.-D. J., & Zang, I. R. (2009). Lösungen für eine neuartige Integration von Produktdesign in den Produktentwicklungsprozess für die Investitionsgüterbranche. Abschlussbericht, Stiftung Industrieforschung, Pforzheim.
- Häggman, A., Tsai, G., Elsen, C., Honda, T., & Yang, M. C. (2015). Connections Between the Design Tool, Design Attributes, and User Preferences in Early Stage Design. *Journal of Mechanical Design*, 137(7).
- Heufler, G. (2012). *Design Basics: von der Idee zum Produkt*. Zürich: Niggli.
- Klopp, E. (2010). Explorative Faktorenanalyse. Beitrag im Internet. <http://psydok.psycharchives.de/jspui/handle/20.500.11780/3369>.

- Krippendorff, K. (1986). Produktsemantik, in M. Krampen & H. Kächele (eds), Umwelt, Gestaltung und Persönlichkeit: Reflexion 30 Jahre nach Gründung der Ulmer Hochschule für Gestaltung, Georg Olms, Hildesheim, Germany, pp. 58-69.
- Kudrowitz, B., Te, P., & Wallace, D. (2012). The influence of sketch quality on perception of product-idea creativity. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 26(3), 267–279.
- Pei, E., Campbell, I., & Evans, M. (2011). A Taxonomic Classification of Visual Design Representations Used by Industrial Designers and Engineering Designers. *The Design Journal*, 14(1), 64–91.
- Self, J. (2016). Why is Sketching (Still) Important (To Design)? Beitrag im Internet.  
*<https://www.core77.com//posts/52948/Why-is-Sketching-Still-Important-To-Design>*
- Wölfel, C., & Thoring, K. (2013). Gestalterische Grundlagenausbildung im Design: zwischen Ästhetik und Erleben. *Papiere zur Designwissenschaft*, pp.79-91.

## Kontakt

Dipl.-Ing. Frank Mühlbauer  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Maschinenwesen  
Professur für Technisches Design  
*[www.tu-dresden.de/design](http://www.tu-dresden.de/design)*

# Konstruktionslösungen mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz

Willi Gründer und Denis Polyakov

## Einleitung

Konstruktionsaufgaben werden im Maschinenbau typischerweise analog zu bereits gelösten Aufgabenstellungen umgesetzt. Dabei liegt der Unterschied der Vorgehensweisen zwischen einem jungen Spezialisten und einem erfahrenen Konstrukteur in der Anzahl bereits bearbeiteter Probleme und der ihnen vertrauten Lösungsmöglichkeiten. Denn erst der langjährige Umgang mit einer bestimmten Materie begründet eine Wissensbasis, auf die dann in unterschiedlicher Form zugegriffen wird. Dies geschieht einerseits über individuell erworbene Kenntnisse und Erfahrungen, die sowohl intuitiv wie strukturiert eingesetzt werden, und andererseits über formalisiertes und katalogisiertes Wissen, die als formalisierte Wissensobjekte und digitale Konstruktionswerkzeuge zur Verfügung stehen.

Letztlich beruht aber auch das formalisierte Technikwissen auf individuellen Erhebungen, Überlegungen und Erkenntnissen, die in langwierigen Harmonisierungsprozessen zu Standards verdichtet werden. In der Normungsarbeit sowie in Entwicklungs- und Forschungsvorhaben entstehen im Diskurs der Ingenieure und Wissenschaftler Regeln und Richtlinien, die den Entwicklern und Konstrukteuren schließlich als Handwerkszeug bereitgestellt werden. Dieser meist mehrstufige und intransparente Prozess der Daten- und Wissensaufbereitung kennzeichnet sowohl unternehmensinternes Wissensmanagement wie auch auf Normen abzielende und branchenweit angelegte Standardisierungsvorhaben (Gründer 2017).

Seitdem die Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) in den Fokus der Ingenieure gelangt sind, spielen sie bei der Aufbereitung von Daten zur Produktionssteuerung eine zunehmende Rolle. Betrachtet man die Produktentstehung ebenfalls als Phase eines Prozesses, wird deutlich, dass die Voraussetzungen für den Einsatz von KI hier ebenfalls gegeben sind. Zwar werden die Eingangsdaten für die Lernphasen nur sehr verzögert und teilweise sporadisch erzeugt. Dennoch gibt es für kontinuierliche Verbesserungsprozesse, die sich analog zum reibungslosen Produktionsablauf verhalten, keine Alternative.

Im Rahmen des Artikels wird ein Ansatz für einen "intellektuellen Konstruktionsassistenten" auf der Basis digitalisierter Erfahrung vorgeschlagen. Diese an die analytischen und numerischen Verfahren anknüpfenden Assistenten werden unter Verwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz erzeugt. Sie sollen bereits bekannte Wissens Elemente und Erfahrungen aufnehmen und durch eine fortgesetzte Spiegelung an der Realität fortschreiben, ohne dass eine aufwendige Algorithmenbildung und zeitraubende Numerik den Transfer neuer, oftmals inhärenter Erkenntnisse in die tägliche Praxis und damit das Qualitätsmanagement behindert. Wissensunterschiede zwischen Abteilungen können auf diese Weise schnell beseitigt und Bildungsunterschiede zwischen Mitarbeitern ausgeglichen werden. Andererseits kann hiermit in den Unternehmen aber auch die Abbildung besonderer Stärken durch einen automatischen Abgleich gleichgelagerter Konstruktionen vorangetrieben werden.

### **Produktentwicklung als erfahrungsgebundener Prozess**

Die Arbeitsweise eines erfahrenen Konstrukteurs hat in der Regel assoziativen Charakter und greift auf bereits von ihm oder von Kollegen abgeschlossene Aufträge zurück, die der aktuellen Aufgabe möglichst nahekommen. Eine notwendige Bedingung für die Entwicklung neuer Konstruktionslösungen ist, dass auf alles Wissen einer Organisation transparent und strukturiert zugegriffen werden kann. Da das Wissen immer häufiger in automatisierten Prozessketten verarbeitet wird, sollte es entsprechend gestaltet sein und in digitaler Form vorliegen. Gelegentlich sind Klassifikationssysteme mit den Merkmalen bereits abgeschlossener Projekte für die Ähnlichkeitssuche verfügbar.



Anschließend werden die Lösungswege an das aktuelle Projekt angepasst. Intuition und Erfahrung dienen hierbei als hauptsächliche Entscheidungswerkzeuge und bilden mit Berechnungen und neueren technischen und wissenschaftlichen Erkenntnissen eine weitere Grundlage für das Lösungsgüst. Man kann diesen Ablauf in folgenden drei Schritten zusammenfassen:

1. Die Suche nach „Close Design Solutions“ als Vorlage für das aktuelle Problem.
2. Die konzeptionelle Anpassung an die aktuellen Erfordernisse.
3. Die detaillierte, den Anforderungen entsprechende Ausarbeitung.

Grundsätzlich neue Produktentwicklungen sollen hier nur insofern betrachtet werden, als sie innerhalb des verfügbaren Wissensspektrums liegen. Dazu zählen natürlich auch solche Lösungen, die aufgrund der durch viele Interdependenzen verursachten Komplexität den herkömmlichen Auslegungsprozessen meistens verwehrt waren.

### **Das mathematische Modell eines intellektuellen Assistenten**

Das oben dargestellte dreistufige Modell zur Erzielung einer Projektlösung entspricht dem analogen Prinzip der Ähnlichkeits- oder Anpassungskonstruktion. Der dahinführende Prozess kann durch eine formalisierte technische Spezifikation in Form eines Vektors der Anforderungen  $X$  und des Vektors der Konstruktionsparameter  $Y$  sowie einer Umwandlungsfunktion  $f(X)$  repräsentiert werden. Der Eingangsvektor  $X = (x_1, \dots, x_n)$  beinhaltet bei einer Getriebeauslegung zum Beispiel Anforderungen wie die Eingangsleistung an der Welle und die erforderliche Winkelgeschwindigkeit. Der Ergebnisvektor  $Y = (y_1, \dots, y_m)$  beschreibt dagegen die gewonnenen Konstruktionsparameter wie Abmessungen, Übersetzung und Zähnezah am Ritzel (siehe Abb. 1). Die Erzielung einer neuen konstruktiven Lösung  $Y_{\text{Neu}}$  entspricht also der Funktion:

$$Y_{\text{Neu}} = f(X_{\text{Neu}})$$

Die verwendete Funktion  $f(X)$  ist in ihrer detaillierten Form zwar zunächst unbekannt, kann jedoch mit Hilfe von Intuition und klassifiziertem Wissen angenähert werden. Voraussetzung ist allerdings dass es eine formalisierte Basis aus  $n$  konstruktiven Lösungen mit entsprechenden Aufgabenstellungen bzw.

diskreten Anforderungen  $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$  gibt. Der erfahrene Konstrukteur erkennt schnell, welche Projekte  $i$  mit entsprechenden  $X_i$ -Werten den Anforderungen  $X_{\text{neu}}$  des neuen Projektes am nächsten kommen. Dies lässt erwarten, dass die entsprechenden  $Y_{\text{neu}}$ -Parameter den gewünschten Anforderungen ebenfalls nahekommen werden.

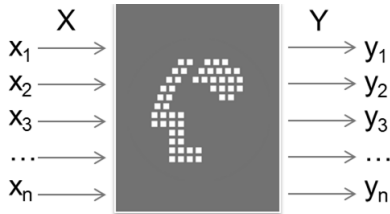


Abbildung 1: Prozessmodell Entstehung einer Konstruktionslösung

Die Annahme hierbei ist, dass ähnliche konstruktive Lösungen einen reproduzierbaren Einfluss der Eingangsparameter  $X_i$  auf die Parameter der konstruktiven Lösung  $Y_i$  haben. Diese zunächst trivial anmutende Prämisse ist eine der Grundlagen der Tätigkeit eines erfahrenen Ingenieurs. Er reduziert nämlich umfangreiche analytische und numerische Prozesse auf die intellektuelle Verarbeitung vorhandener Erfahrung. Mathematisch gesehen kann dieser Prozess als eine Optimierungsaufgabe auf der Grundlage eines Regressionsmodells unter Verwendung einer vorhandenen „Datenbank“ mit bekannten Lösungen beschrieben werden. Auf diese Weise kann der Konstrukteur selbst komplexe Optimierungen durchführen, ohne die inneren Zusammenhänge einer Aufgabe näher zu beleuchten. Denn dies leisten die intellektuellen Fähigkeiten seiner neuronalen Netze, die in der Problemerkennung sowie in ihrer Assoziations- und Kombinationsfähigkeit ein jahrelanges Training erfahren haben. Die Methoden der Künstlichen Intelligenz setzen genau hier an: bei der Nachbildung klassischer geistiger Tätigkeiten.

Die Verarbeitung von Informationen durch einen Ingenieur lassen immer einen gewissen Interpretationsspielraum zu, sie können unscharf und widersprüchlich sein. Die rechnergestützte Verarbeitung verlangt dagegen, jedenfalls heute, formalisierte Prozessparameter. Das heißt alle am Prozess beteiligten Informationen wie Produkteigenschaften, Anforderungen und Randbedingungen müssen eine eindeutige Semantik und Syntax aufweisen

und. Dies kann am besten durch eine geeignete Klassifikation erreicht werden. Wie diese beschaffen sein sollte bzw. welches System man implementiert, richtet sich nach dem Aufgaben-gebiet und nach den am jeweiligen Verfahren beteiligten Nutzergruppen.

### **Ein kurzer Einblick in die Methoden der Künstlichen Intelligenz**

Es gibt sehr viele Prozesse, die zu kompliziert sind, um sie analytisch zu beschreiben. In solchen Fällen erfahren Methoden der Künstlichen Intelligenz eine zunehmende Bedeutung. Eine besondere Stellung nimmt hierbei das Maschinelle Lernen ein. Beim Maschinellen Lernen werden aus Beispielen gleichgelagerter Aufgabenstellungen innere Gesetzmäßigkeiten bzw. funktionale Zusammenhänge identifiziert und extrahiert. Dies geschieht unter Verwendung bestimmter Lernalgorithmen innerhalb neuartiger KI-Entwicklungsumgebungen, deren Reifegrad außerordentlich schnell wächst. Im Gegensatz zu deduktiv aus Daten und explizitem Wissen erstellten Expertensystemen und Wissensdatenbanken, die aufwendig zu pflegen und dementsprechend sehr wenig flexibel sind, erfolgt die Wissensrepräsentation hierbei mit Hilfe des Maschinellen Lernens, ohne dass explizite Regeln generiert werden (Felden 2016). Mit Deep-Learning als Teilbereich des Maschinellen Lernens werden heute vor allem Sprache und Bilder erkannt und klassifiziert. Dabei wird üblicherweise eine sehr große Menge an Daten benötigt, denn um ein Objekt zu erkennen, muss dieses in leichter Variation in sehr großer Anzahl in den Lerndaten vorhanden sein. Inzwischen gibt es aber auch Ansätze, um Erkenntnisse auch schon aus einer vergleichsweise geringen Datenmenge zu gewinnen (Döbel I., u.a., 2018). Ein neuronales Netz besteht aus künstlichen Neuronen und orientiert sich hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Funktionsweise am menschlichen Gehirn. Dadurch soll ein neuronales Netz in der Lage sein, besonders realistische Berechnungen zu erstellen (Litzel 2016). Der schematische Aufbau eines künstlichen neuronalen Netzes (KNN) ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt.

Hierbei sieht man, dass die KNN aus mehreren Schichten künstlicher Neuronen bestehen. Lernen bedeutet dabei, aus den Differenzen zwischen den Ausgabewerten und den richtigen Antworten rückwärts die Korrekturen der Gewichte durchzuführen, damit die Unterschiede minimal werden. Anstatt

von Signalen verarbeiten die KNN Zahlenmengen, welche mathematisch gesprochen als „Vektoren“ transformiert werden (Döbel I., u.a., 2018).

Um das angestrebte Ziel, die Entwicklung eines „intellektuellen Konstruktionsassistenten“ zu erreichen, ist gemäß dem vorgeschlagenen dreiphasigen Modell ein synthetischer Ansatz erforderlich, der sowohl die Wissensbasis als auch Regressionsmodelle umfasst. Künstliche neuronale Netzwerke bieten sich hierfür insofern an, als sie sowohl Klassifizierungsaufgaben als auch die Regressionsbildung unterstützen können.

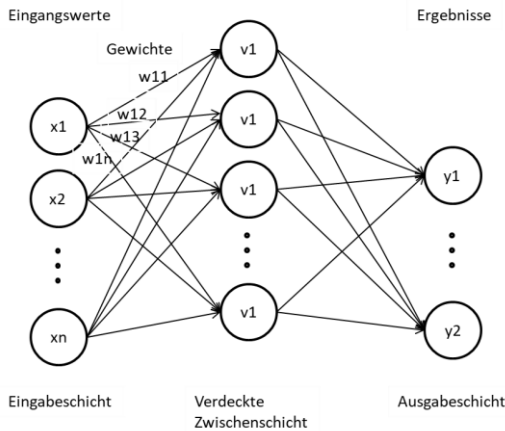


Abbildung 2: Aufbau eines künstlichen neuronalen Netzes (KNN) (Haykin 2009, adaptiert)

## Die Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen

Für die Nutzung von neuronalen Netzen gibt es mittlerweile eine Vielzahl von Entwicklungsumgebungen. Da zum Zeitpunkt der Sammlung erster Erfahrungen mit neuronalen Netzen gute Programmierkenntnisse in der C#-Sprache vorlagen, fiel die Auswahl auf die API von Accord.Net. Aus heutiger Sicht wäre die Entscheidung eher zugunsten von Keras oder Tensorflow getroffen worden, die auf der Sprache Python basieren, da hiermit auch eingebettete Lösungen realisiert werden können. Außerdem kann dabei auf die nicht zu unterschätzende Erfahrung und Unterstützung der heute sehr großen Community für beide Systeme zurückgegriffen werden.

Die Verwendung von einem neuronalen Netz setzt ein entsprechendes Training des Netzes voraus. Im Allgemeinen besteht das Ziel des Trainings darin, die Intensität der Gewichte für die Informationsübertragung zwischen den Neuronen zu finden. Die auf vorbestimmten Lernregeln beruhende Lernphase eines neuronalen Netzes liegt deshalb im Aufbau einer Regression, die sich dem ursprünglich bekannten Satz experimenteller Daten maximal annähert. Lernregeln wie die Hebb-Regel, Delta-Regel, Backpropagation (Kriesel 2010) sind stark von der Art des Netzes und den Lerndaten abhängig und sollen hier zunächst nicht näher betrachtet werden. Stattdessen wird der Fokus auf die Aufbereitung der Lerndaten gelegt, denn diese bilden den eigentlichen Content bzw. die zu digitalisierende Erfahrung ab.

Die Vorgehensweisen bei der Entwicklung eines KI-Modells richten sich danach, ob bereits ähnliche Aufgabenstellungen und entsprechende Modelle existieren. Denn setzt man eine komplexe Aufgabe auf ein schon bestehendes KI-Modell auf, kann der eigene Trainingsaufwand verringert werden und die benötigte Datenmenge hält sich in Grenzen. Idealerweise muss man die Maschinen so aufbauen, dass sie auch anhand weniger Beispiele lernen können (Döbel I., u.a., 2018).

## Digitalisierung des Wissens und der Erfahrung

Wie bereits vorher ausgeführt wurde, kann jede erfolgreiche Konstruktion durch die Vektoren  $X$  (Eingabeparameter) und  $Y$  (Produktmerkmale, Beiwerte) beschrieben werden. Daher reicht es aus, diese beiden Vektoren in einer Datenbank abzulegen, um erfolgreiche und beispielhafte Lösungen eindeutig zu kennzeichnen. Bei einer neuen Konstruktionsaufgabe wird dann gemäß einem neuen Eingabvektor  $X_{\text{neu}}$  mit Hilfe des angelernten neuronalen Netzes (gewonnenes Regressionsmuster) der neue Vektor  $Y_{\text{neu}}$  bestimmt. Erweist sich das dabei erzielte Ergebnis als zutreffend, kann es unmittelbar bzw. nach entsprechender Korrektur für das Nachlernen des Systems genutzt werden. Dies führt zu einer fortschreitenden Festigung des Modells.

Bevor man mit der Eingabe der charakteristischen Merkmale des Erfahrungswissens beginnt, kann es sinnvoll sein, die Aufgabe so zu strukturieren, dass sie in mehrere Teilaufgaben zerfällt. Solche Teilaufgaben können z.B. bereits bekannte, in Normen und Richtlinien abgebildete Zusammenhänge beschreiben, um die Funktionsfähigkeit des zu erstellenden Systems auf eine sichere

Grundlage zu stellen. Zwar führt die Umsetzung einer Norm nach einem standardisieren Prozess, z.B. zur Berechnung von Schrauben oder Wellen, nicht zu neuen Erkenntnissen, bildet aber die Basis für die nachfolgende Erweiterung auf komplexere und praxisnahe Aufgabenstellungen. Ergänzt werden können die herkömmlich gewonnenen normierten Erfahrungen mit empirisch gewonnenen Erkenntnissen. Allgemein gilt, dass unterschiedliche Verfahren der Datenerhebung wie Messungen, Beurteilungen und Testergebnisse als Referenzdaten für das Maschinelle Lernen in Frage kommen (Bortz 1984). Gemeinsam mit dem Fundus an theoretischen Grundlagen aus dem jeweiligen Fachgebiet führen diese Daten schließlich zum „intellektuellen Assistenten“.

Ein Beispiel für die Entwicklung eines solchen Assistenten ist die Werkstoffkenndaten-Ermittlung nach FKM (FKM 2012) in Abhängigkeit von der Teilegeometrie und den Betriebsbedingungen. Dabei beschreiben die identifizierten Muster die Eigenschaften von Materialien unter realen Einflüssen, und zwar quantitativ mit bestimmten Toleranzen, die u.a. von der Größe des verfügbaren Datenkonvoluts abhängen. So ist es möglich, für dedizierte Einsatzbedingungen eines Produktes Kennwerte zu erhalten, die zuvor niemals gemessen wurden. Bei diesem Beispiel basierte die Modellerstellung allerdings noch auf herkömmlichen Regressionsmethoden und auf individuellen Interpretationen des jeweiligen Bearbeiters. Durch die Einführung von KI wird die bisher durch Formelwerke repräsentierte Abstraktionsebene entbehrlich und es können auf der Basis von künstlichen neuronalen Netzen deutlich genauere Modelle erstellt werden.

### **Eine praktische Anwendung**

Mit der Anwendung des Maschinellen Lernens in der Konstruktion lässt sich nicht nur die Performance eines Prozesses verbessern wie bei der Bildung von Ersatzmodellen für FE-Berechnungen auf Basis künstlicher neuronaler Netze, sondern es lassen sich auch vollständig neue Prozesse generieren. Nachfolgend wird ein Beispiel für die Erstellung einer neuartigen Rückwärtsrechnung auf Basis der bekannten Parameterbeziehungen aus der Vorwärtsrechnung dargestellt. Hierbei geht es um den rechnerischen Nachweis der Lebensdauer einzelner Komponenten im Betrieb. Ein gutes Beispiel dafür ist die Bestimmung der Lebensdauer sowie der statischen Sicherheit eines

Wälzlagers. Für diese Aufgabe existieren die analytischen Methoden der etablierten Norm DIN ISO 281. Mit ihnen ist eine Nachrechnung ausgewählter Komponenten bzw. Konfigurationen möglich.

Die DIN ISO 281 wird verwendet, um die Beziehungen zwischen der gewählten Geometrie und Belastung eines Lagers mit den gesuchten Größen wie Lebensdauer und statische Sicherheit zu beschreiben. Hier soll nun ein künstliches neuronales Netz (KNN) mit den beschriebenen Berechnungsparametern trainiert werden, so dass im Laufe des Trainingsprozesses die inverse Funktion für die Abhängigkeit der Geometrieparameter des Lagers von der Belastung, der geforderten Lebensdauer und der statischen Sicherheit entwickelt wird.

Zunächst erfolgt eine Vorwärtsrechnung für eine Welle-Lager Baugruppe mit folgenden Parametern:

Lager: Rillenkugellager; Innendurchmesser  $d = 60$  mm, Außendurchmesser  $D_a = 78$  mm, Lagerbreite  $B = 10$  mm, dynamische Tragzahl  $C = 12600$  N, statische Tragzahl  $C_0 = 11100$  N.

Belastung: Radiale Kraft  $F_r = 1500$  N, Axiale Kraft  $F_a = 900$  N.

Antriebsdaten: Drehzahl  $n = 1200$  1/min.

Mindestlebensdauer:  $l_{h10} = 2000$  h.

Mindestsicherheit (statisch): 1,3

Ein nach DIN ISO 281 durchgeführter Lebensdauernachweis liefert eine zu erwartende Lebensdauer von 2672 h und eine statische Sicherheit  $S_0$  von 7,4. Damit ist die Konstruktion mit dem Faktor 1,3 dynamisch und dem Faktor 5,0 statisch ausreichend dimensioniert.

Für dieselbe Aufgabe wird ein neuronales Netz aufgebaut und trainiert. Als Entwicklungsumgebung für das Maschinelle Lernen wurde die Open-Source Bibliothek Accord.Net (Accord.net 2019) ausgewählt. Das aufgebaute Netz besteht aus drei Schichten. Die erste Schicht beinhaltet sechs Neuronen und die Ausgabeschicht vier. Beide Größen entsprechen der Anzahl der Eingabe- bzw. Ausgabeparameter. Die Zwischenschicht setzt sich aus 25 Neuronen zusammen. Die Anzahl der Neuronen in der Zwischenschicht wurde experimentell ermittelt und entspricht dem Wert mit den minimalen Abweichungen

in der Testphase. Die Trainingsdaten beinhalten eine Geometrieviation des Lagers der Lagerreihe 618 entsprechend dem inneren Durchmesser von  $d = 20 \text{ mm}$  bis  $d = 80 \text{ mm}$ . Die Belastungen werden von  $10 \text{ N}$  bis  $1500 \text{ N}$  jeweils für die radiale und axiale Kraft variiert. Insgesamt wurden dafür etwa 1200 Datensätze generiert. Anschließend erfolgte die Prüfung des Modells an Testbeispielen, die nicht in der Lernphase verwendet wurden. Ein Auszug aus dem Vergleich der mit dem neuronalen Netz ermittelten Größen mit den Werten aus der analytischen Berechnung ist in der Abbildung 3 dargestellt.

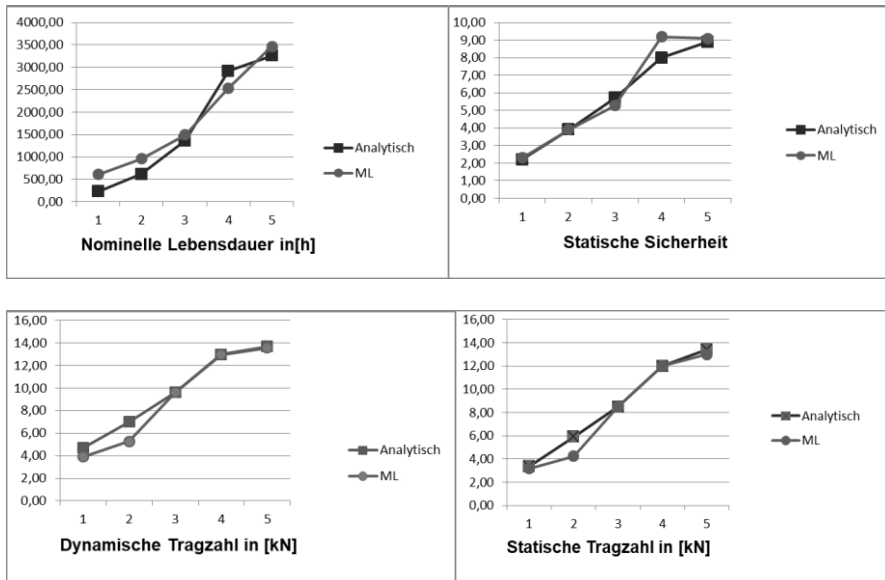


Abbildung 3: Vergleich der Ergebnisse (analytisch nach DIN ISO 281 und mit Maschinellem Lernen (ML))

Die Auswertung der Ergebnisse dieser Nachrechnungen zeigt eine maximale Abweichung von knapp 13% bei der statischen Sicherheit und ca. 5% bei den anderen Größen. Diese Werte können durch eine Feinjustierung des künstlichen neuronalen Netzes bzw. der zum Anlernen verwendeten Daten reduziert werden. Für die prinzipiellen Überlegungen ist dies aber hier nicht notwendig.

Eine weitaus komplexere Aufgabe stellt sich, wenn es nicht um eine Verifizierung, sondern um die Auswahl einer optimalen Lagergeometrie bei gegeben-



nem Wellendurchmesser geht. Konventionell kann diese Aufgabe über Nachrechnungen mit unterschiedlichen Geometrien für vorhandene Annahmen zum Last- und Betriebszustand gelöst werden. Das kann zu einer großen Anzahl von Berechnungen führen, bevor eine optimale Lösung gefunden wird. Allerdings beschränkt sich dabei der Lösungsraum auf die im Katalog vorhandenen Ausführungen.

Im Rahmen der dargestellten Überlegungen wird dagegen ein Weg skizziert, mit dem man unter Verwendung von Methoden des Maschinellen Lernens eine Rückwärts- oder Entwurfsberechnung erzeugt. Hierbei wird durch das Anlernen eines neuronalen Netzes mit den vertauschten Eingabe- und Ausgabeparameter aus der Vorwärtsrechnung ein geeignetes Prozessmodell generiert. Da die inverse Aufgabe eine sehr große Anzahl an Lösungen aufweisen kann, werden bestimmte Betriebs- und Geometriebedingungen angenommen, um die Variantenvielfalt bei den Lösungen einzuschränken. In den Abbildungen 4 und 5 ist der Aufbau des jeweiligen KNN-Berechnungsmodells für die Vorwärts- und Rückwärtsrechnung dargestellt.

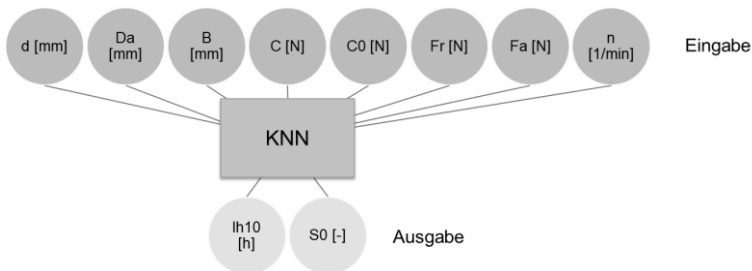


Abbildung 4: Aufbau des KNN-Modells für die Nachrechnung

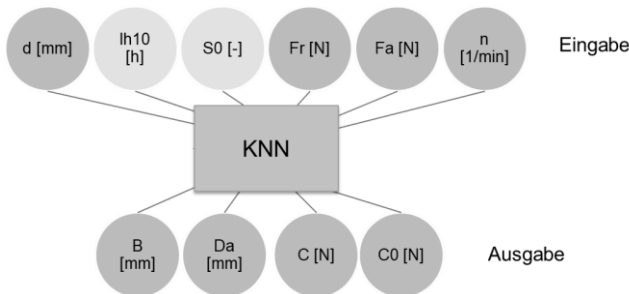


Abbildung 5: Aufbau des KNN-Modells für den Entwurf

Für das Anlernen des Zweiten KNN-Modells wurden die gleichen Lernbeispiele verwendet wie für das erste Modell. Die Prüfaufgabe wurde wie folgt definiert:

Es ist ein Lager zu finden welches für die Betriebsbedingungen von:  $F_r$ : 450 N,  $F_a$ : 1200 N und  $n$ = 800 1/min und der erwarteten Lebensdauer von 15000 h verwendet werden soll. Der Wellendurchmesser soll 85 mm betragen.

Nachfolgend ist der Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen mit KNN und dem konventionellem Software (nach DIN ISO 281) dargestellt.

Quelle	d [mm]	D [mm]	B [mm]	C [N]	$C_0$ [N]	$L_{h10}$ [h]	$S_0$ [-]
Berechnung DIN ISO 281	85	110	13	20400	19800	18069	22,8
KNN	85	109	12,6	17034	19240	15000	16,6

Tabelle 1: Ergebnisse der Auslegung

Die Analyse des Ergebnisses ergibt, dass die Geometrieproportionen der Lagerreihe 618 eingehalten wurden. Das mit KNN ermittelte Lager war nicht Gegenstand der Lernbeispiele und repräsentiert damit eine völlig neue Lösung im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise. Mit der Erweiterung dieses Modells auf weitere Parameter wie Lagertyp, Lagerreihe, etc. wird es möglich sein, auf Basis der Beziehungen aus dem Nachrechnungsprozess den Auslegungsprozess noch besser zu unterstützen.

## Fazit

Die Anwendung von Maschinellern wird der Maschinenbau-Konstruktion neue Impulse geben. Wertvolle Erfahrungen und Erkenntnisse aus ungezählten Projekten, die heute auf viele Mitarbeiter und Dokumente verteilt sind und nur in wenigen Fällen einem stringenten und nachvollziehbaren Algorithmus folgen, können nunmehr, wenn auch unscharf, nachvollziehbar als Muster und Modelle unternehmensweit und generationenübergreifend abgelegt werden. Voraussetzung ist allerdings eine merkmalsorientierte Beschreibung der Bedingungen und Anforderungen bereits ausgeführter Projekte, um das Maschinelle Lernen zum Erfolg zu führen.

Ausgehend von den Grundlagen des Konstruierens und des Maschinellen Lernens wurde aufgezeigt, wie sich standardisierte Berechnungsabläufe mit hinreichender Genauigkeit auch als KI-Modell darstellen lassen. Ihre Wirkung entfalten diese normenbasierten Modelle allerdings erst dann, wenn eigene Konstruktionsergebnisse sowie verifizierte Projekte der Fach-Community hinzukommen und den engen Bereich der Norm auflösen. In der Folge lassen sich Berechnungsnormen auf der Basis offener KI Umgebungen in Richtung spezieller Problemstellungen erweitern, ohne dass analytische Beziehungen entwickelt werden müssen.

Es wurde darüber hinaus nachgewiesen, dass mit Hilfe Künstlicher Neuronaler Netze auch Vorlagen für Auswahlprozesse und Auslegungsberechnungen erzeugt werden können. Die KI-Modelle werden dabei aus den vertauschten Input- und Output-Daten einer großen Menge ausgeführter Projekte und Berechnungen abgeleitet. Dies gilt für numerische Analysen wie FEM-Berechnungen, die in KI-gestützten Ersatzmodellen abgebildet werden, ebenso wie für die heute meist vielschichtigen, durch viele Iterationen geprägten Auslegungsverfahren in den verschiedenen Phasen der Produktentstehung.

Weitere Arbeiten werden insbesondere die Anpassung der Entwicklungsumgebung an die besonderen Bedingungen der Anwendung, die Usability der Anwendung selbst, die Erweiterung der Anwendung auf Autorenfunktionen sowie die Entwicklung mehrstufiger Netzwerke betreffen. Dabei gilt es, die Dynamik der eigenen Arbeiten und Überlegungen jederzeit mit den am Markt verfügbaren Entwicklungswerkzeugen abzugleichen. Schließlich stellt sich die Aufgabe, diese neuen Konstruktionswerkzeuge in die Arbeitsabläufe der Konstrukteure so einzubinden, dass der dabei entstehende Content nicht nur von jedermann genutzt und überprüft, sondern auch auf seine eigenen Ergebnisse hin angepasst und erweitert werden kann.

## Literaturverzeichnis

- Accord.Net: 2019, Accord Framework .Net (8.3) [Software], Abgerufen von <http://accord-framework.net/>
- Bortz J., 1984: Lehrbuch der empirischen Forschung, für Sozialwissenschaftler. Berlin Heidelberg New York Tokio, Springer-Verlag.
- DIN ISO 281:2010-10, Wälzlager - Dynamische Tragzahlen und nominelle Lebensdauer
- Döbel I., u.a., 2018: Maschinelles Lernen – Kompetenzen, Anwendungen und Forschungsbedarf, Projektbericht, Fraunhofer.

- Felden C., 2016: Künstliche Intelligenz, Abgerufen 05.03.2019, <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/KI-und-Softcomputing/Kunstliche-Intelligenz>
- FKM: 2012, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, Frankfurt am Main, VDMA Verlag
- Gründer W., 2017: Big Data und Mashine Learning in der Produktentwicklung. In: Berthold Schlecht (Hrsg.): Dresdener Maschinenelemente Kolloquium MDK 2017, 71-82, Göttingen: sierke Verlag
- Haykin A., 2009: Neural networks and learning machines, 3rd ed. Prentice Hall: Pearson.
- Keras: 2019: The Python Deep Learning library [Software], Abgerufen von <https://keras.io/>
- Kriesel D., 2010: Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze, Abgerufen am 05.03.2019, [http://www.dkriesel.com/\\_media/science/neuronalenetze-de-zeta2-2col-dkrieselcom.pdf](http://www.dkriesel.com/_media/science/neuronalenetze-de-zeta2-2col-dkrieselcom.pdf)
- Litzel N., 2016: Was ist Künstliche Intelligenz / Artificial Intelligence?, Abgerufen am 05.03.2019, <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-kuenstliche-intelligenz-artificial-intelligence-a-562354/>
- Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.-H., 2013: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Berlin: Springer
- Spur, G, Krause, F.-L., 1984: CAD-Technik. Lehr und Arbeitsbuch für die Rechnerunterstützung in Konstruktion und Arbeitsplanung. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Tensorflow 2019: An end-to-end open source machine learning platform, [Software], Abgerufen von <https://www.tensorflow.org/>
- Vajna S., Weber C., Bley H., Zeman K., 2009: CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. Berlin/Heidelberg. Springer.
- VDI 2221: 1993, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

## Kontakt

Prof. h.c. Dr.-Ing. Willi Gründer  
TEDATA GmbH  
Königsallee 45

Dr.-Ing. Denis Polyakov  
TEDATA GmbH  
Königsallee 45

# Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio zum Vergleich von Datenanalyseprojekten in der Produktentwicklung

Sebastian Klement, Bernhard Saske, Stephan Arndt und Ralph Stelzer

## 1 Einleitung

Die Künstliche Intelligenz (KI) mit ihren untergeordneten Forschungsgebieten wie maschinelles Lernen (ML), Spracherkennung oder Robotik ist in aller Munde. Die Leistungsfähigkeit und Stabilität von Anwendungen, die im weiteren Sinne KI zur Aufgabenbearbeitung einsetzen, sind gestiegen und durchdringen die Gesellschaft immer mehr. Weltweit wird die KI als eine Schlüsseltechnologie wahrgenommen, die in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnt (Bitkom, DFKI 2017). So zielt auch die Ausschreibung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie von 02/2019 darauf ab, KI als Schrittmachertechnologie für „[...] volkswirtschaftlich relevante Ökosysteme“ zu fördern (BMWi 2019).

Mit der zunehmenden Ausstattung der Produktionsmittel mit Sensoren und der gleichzeitig steigenden Vernetzung dieser, steigt auch die Menge verfügbarer Daten, die für die Generierung von Wissen genutzt werden können (Fraunhofer 2018). Davon profitiert besonders das ML als Teilgebiet der KI. So unterschiedlich die gewonnenen Daten sind, so unterschiedlich sind die Aufgaben, die innerhalb des Maschinenbaus mit diesen bewältigt werden können. Ziele, die mit dem Einsatz von ML verbunden werden, sind beispielsweise selbst optimierende Produktionssysteme oder die bedarfsgerechte Instandhaltung von Anlagen auf Grund einer möglichst genauen Prognose des Ausfallzeitpunktes der Komponenten.

Ebenso wie jede andere Technologie bedarf der Einsatz von ML Ressourcen, die in den Unternehmen nur begrenzt vorhanden sind. Die Entscheidung für

oder gegen einen Einsatz von ML in Maschinenbauprodukten ist derzeit ganz klar eine strategische und bedingt die Einbeziehung verschiedener Fachbereiche bis hin zum Management des Unternehmens (Saltz et al. 2017). Daher wird ein strategisches Diskussions- und Entscheidungswerkzeug benötigt, welches ein Projekt aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht darstellen und fachübergreifend genutzt werden kann sowie ein strukturiertes Vorgehen ermöglicht.

Die Autoren schlagen zur Entscheidungsfindung die Nutzung des hier eingeführten Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolios vor, welches speziell auf die Fragestellung des ML Einsatzes im Maschinenbau zugeschnitten ist. Es werden Bewertungstabellen vorgestellt und deren Nutzung erläutert, welche sich an den zu bearbeitenden Prozessschritten für komplexe Datenanalysen (Shearer 2000, Klement et al. 2018) orientiert. Die Ableitung von Normstrategien wird anhand der finalen Darstellung des Portfolios diskutiert.

## **2 Eigenschaften komplexer Datenanalysen in der Produktentwicklung**

Komplexe Datenanalysen (engl. Advanced Analytics) sind durch eines oder mehrere folgender Merkmale gekennzeichnet:

1. Große Mengen zu analysierender Daten,
2. Daten aus verschiedensten Quellen (PDM, ERP, Maschinendaten, etc.),
3. Unterschiedliche Datenformate (Zeitreihen, Text, Bild, Geometriedaten, etc.), die strukturiert und unstrukturiert vorliegen,
4. Anwendbarkeit moderner Analysemethoden (z.B. Machine Learning-Methoden).

Die gegebene Definition komplexer Datenanalysen schließt Big Data Analysen (NIST 2018a, Volk et al. 2017) mit ein, beschränkt sich jedoch nicht auf diese.

Ist der Gesamtumfang einer Datenanalyse zu Beginn nicht absehbar, wird eine ausführliche Planung notwendig. Diese Planung erfordert eine detaillierte Abstimmung auf die Gegebenheiten im Unternehmen. Die Durchführung komplexer Datenanalysen erfolgt in Projektform und wird im Folgenden als Datenanalyseprojekt bezeichnet.

Datenanalyseprojekte in der Produktentwicklung sind nie autark, sondern immer im Rahmen der Entwicklung eines Produktes zu betrachten. Zielstellungen der Datenanalyseprojekte in der Produktentwicklung können sein:

- Die Einführung neuer datengetriebener Produkteigenschaften (Neuentwicklung),
- Die Optimierung oder Erweiterung bestehender Produkteigenschaften (Anpassungs- und Neuentwicklung).

Neuentwicklungen bieten die Möglichkeit maschinenbezogene Datenquellen wie Sensoren bereits in der Konzeptionsphase vorzusehen. Dies ermöglicht eine Datenerfassung entsprechend dem Ziel des Projekts (z.B. der Einführung prädiktiver Wartung). Anpassungsentwicklungen erfolgen für Produkte, die bereits am Markt verfügbar sind. Hier werden Daten genutzt, die bereits erfasst und kommuniziert werden. Eine Erweiterung der verfügbaren Datenquellen ist nur beschränkt möglich.

Anforderungen an eine erfolgreiche Durchführung von Datenanalyseprojekte lassen sich auf verschiedene Weisen systematisieren (Saltz et al. 2016, Cato et al. 2015, NIST 2018b). Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Einteilung der Anforderungen in Anlehnung an Saltz et al. (2016) in die fünf Hauptkategorien (siehe Abbildung 1):

- Führung und Management,
- Prozess,
- Mitarbeiter,
- Werkzeuge und
- Daten.

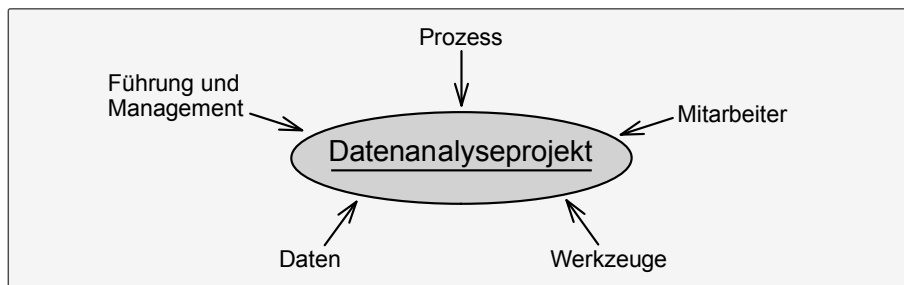


Abbildung 1: Anforderungskategorien zur Durchführung der Datenanalyseprojekte

Unter der Kategorie *Führung und Management* werden Anforderungen gestellt, die eine systematische Durchführung von Datenanalyseprojekten in einem Unternehmen erst ermöglichen. Dazu gehören unter anderem die Unterstützung des Top-Managements sowie eine vorhandene Datenstrategie (Wilberg et al. 2018). Sie bilden den organisatorischen Rahmen in dem Datenanalyseprojekte durchgeführt werden. Diese Anforderungen werden in der weiteren Betrachtung als erfüllt vorausgesetzt.

In der Kategorie *Prozess* werden Anforderungen an die Durchführung der Datenanalyseprojekte zusammengefasst. Saltz et al. (2016) beschränken sich hier auf allgemein gehaltene Anforderungen. Die Autoren dieses Beitrags sehen wohldefinierte und integrierte Analyseprozesse als Schlüssel zur systematischen Durchführung von Datenanalyseprojekten in der Produktentwicklung. Über solche Prozesse kann bereits ein Großteil der Anforderungen an Datenanalyseprojekte methodisch erfasst und erfüllt werden (Klement et al. 2018).

Die Kategorie *Mitarbeiter* fasst alle Anforderungen bezüglich der Mitarbeiterqualifikation zusammen, die zur Durchführung der Datenanalyseprojekte notwendig sind. An der Durchführung der Projekte sind verschiedenste Rollen und Fachabteilungen beteiligt. Dazu gehören Ingenieure (Mechanik, Elektrik, Software), IT-Fachkräfte, Datenanalysten, Datenbankspezialisten, Automatisierungsingenieure und weitere. Jedes Datenanalyseprojekt stellt individuelle Anforderungen an die beteiligten Rollen (Saltz et al. 2017, NIST 2018b).

Die Kategorie *Werkzeuge* beinhaltet Anforderungen an die zur Datenanalyse benötigten Methoden und Technologien. Darunter zählen Technologien zur Datenakquise (OPC UA, MTConnect), Datenspeicherung (relationale und skalierbare Datenbanken wie Apache Hadoop, Apache Spark), Datenvorverarbeitungs- und Analysetechnologien (Python, R, KNIME, MATLAB) und Technologien zur Ergebnisnutzung. Zu den genannten Punkten existiert eine enorme Menge erhältlicher Lösungen. Einige sind Open Source und frei verfügbar, andere werden als proprietäre Softwarepakete angeboten. Viele ermöglichen die Bearbeitung mehrerer bis aller Prozessschritte der Datenanalyse und sind häufig skalierbar. Sie sind sowohl lokal auf Desktopcomputern als auch auf Cloud-Diensten nutzbar.



In der Kategorie *Daten* sind alle Anforderungen an die Daten der Datenanalyseprojekte zusammengefasst. Dazu zählen Anforderungen an die Datenverfügbarkeit, Datenspeicherung, Datenqualität und Datensicherheit.

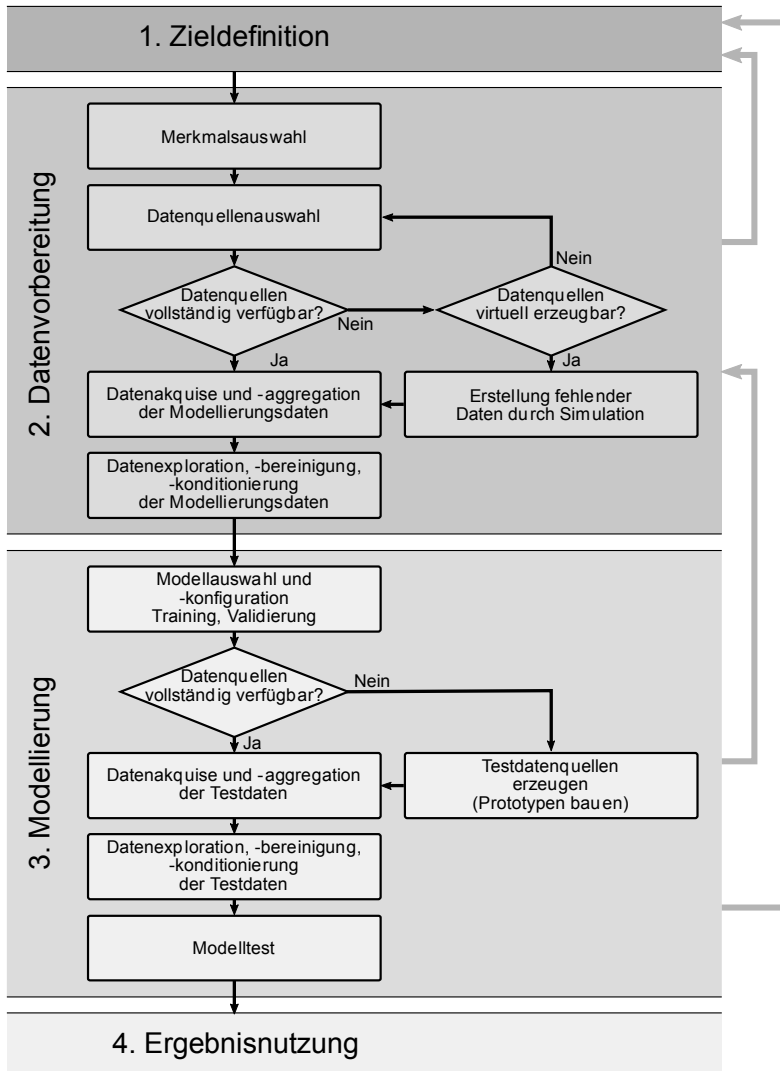


Abbildung 2: Prozessmodell komplexer Datenanalysen in der Produktentwicklung nach Klement et al. (2018)

Zur weiteren Betrachtung wird das von Klement et al. (2018) beschriebene Prozessmodell zur Durchführung komplexer Datenanalysen in der Produktentwicklung genutzt (siehe Abbildung 2).

Das Prozessmodell ist in die vier Prozessphasen:

- *Zieldefinition*,
- *Datenvorbereitung*,
- *Modellierung* und
- *Ergebnisnutzung*

unterteilt. Zu den einzelnen Prozessphasen werden Prozessschritte, Bedingungen und spezifische Aufgaben definiert.

Die *Zieldefinition* beinhaltet die eindeutige und überprüfbare Definition der Zielstellung einer Datenanalyse inklusive einer Abschätzung der vorhandenen Unternehmensressourcen (Mitarbeiter, Technologie, etc).

In der Prozessphase der *Datenvorbereitung* werden die zur Analyse benötigten Datenquellen, die Akquise und Vorverarbeitung der Daten zusammengefasst. Wenn möglich, werden nicht vorhandene Daten virtuell erzeugt. Ergebnis ist ein zur Modellierung geeigneter Datensatz.

Während der *Modellierung* erfolgt die Analyse des Datenbestands mit Hilfe geeigneter Methoden und Werkzeuge entsprechend der festgelegten Zielstellung. Außerdem werden die Ergebnisse der Analyse im späteren Anwendungsbereich getestet und bewertet.

Mit der *Ergebnisnutzung* gehen die Ergebnisse der Modellierung in den vorgesehenen Anwendungsbereich ein.

### **3 Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio**

Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio ist ein fachübergreifend nutzbares Diskussions- und Entscheidungswerkzeug. Das Portfolio bewertet Datenanalyseprojekte hinsichtlich des Aufwands der Durchführung und des Nutzens am Markt anhand der Hauptkriterien Analysekompetenz und Marktpriorität.

Die Analysekompetenz ist ein Maß für die Stärke des Unternehmens das geplante Datenanalyseprojekt umzusetzen. Je höher die Analysekompetenz ist,

desto geringer ist der Aufwand ein Projekt durchzuführen. Das Kriterium bewertet das Unternehmen anhand der in Kapitel 2 vorgestellten Anforderungskategorien *Mitarbeiter*, *Werkzeuge* und *Daten*. Die strukturierte Ermittlung der Analysekompetenz erfolgt entlang des Analyseprozesses.

Die Marktpriorität misst den Mehrwert, den das Ergebnis des Datenanalyseprojektes am Markt bedeutet. Die Marktpriorität wird über die Bewertung der *relativen Wettbewerbsstärke* und der *Marktattraktivität* ermittelt.

Das Ergebnis des Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolios ist ein Vergleichsdiagramm, das die Hauptkriterien Analysekompetenz und Marktpriorität für jedes DA-Projekt des Portfolios gegenüberstellt (siehe Abbildung 3).

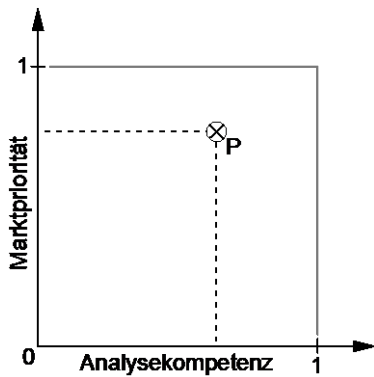


Abbildung 3: Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio

Die Achsen des Diagramms sind normiert und reichen von Null bis Eins. Null steht für eine sehr geringe Analysekompetenz und Marktpriorität, Eins für eine perfekte Analysekompetenz und eine äußerst hohe Marktpriorität. Die Koordinaten der Analysekompetenz und der Marktpriorität werden mit Hilfe untergeordneter Bewertungstabellen und Vergleichsdiagramme bestimmt.

Aus dem Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio lassen sich Normstrategien ableiten, die eine Orientierung im Umgang mit den Projekten liefern (siehe Kapitel 4).

### 3.1 Ermittlung der Analysekompetenz

Die Ermittlung der Analysekompetenz dient der Beantwortung folgender Hauptfrage:

„In wie weit ist das Unternehmen in der Lage das Datenanalyseprojekt umzusetzen?“

Die Autoren schlagen einen starken Fokus auf den Analyseprozess zur Beantwortung der Hauptfrage vor. Ein Unternehmen wird demnach eine hohe Analysekompetenz zugesprochen, wenn es in der Lage ist, den gesamten Prozess eines Datenanalyseprojektes durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich am Prozess nach Klement et al. (2018) orientiert (siehe Abbildung 2).

Der Prozess wird zur strukturierten Betrachtung in die einzelnen Prozessschritte unterteilt. Die Analysekompetenz wird demnach aus den Bewertungen der einzelnen Prozessschritte in den Anforderungskategorien *Mitarbeiter*, *Werkzeuge* und *Daten* bestimmt. Die Ermittlung erfolgt anhand einer Bewertungstabelle (siehe Tabelle 1).

		Mitarbeiter	Werkzeuge/Daten	
<b>Datenvorbereitung</b>				
PS1	Merkmalsauswahl	5	3	
PS2	Datenquellenauswahl		5	5
PS3	Datenquelle virtuell erzeugen	3	3	
PS4	Datenakquise, -aggregation	1	1	→ kritischer Prozessschritt
PS5	Datenexploration, -bereinigung, -konditionierung	3	5	
<b>Modellierung</b>				
PS6	Modellauswahl, -konfiguration Training und Validierung	2	4	
PS7	Testdatenquellen virtuell erzeugen	3	3	
PS8	Testdatenakquise, -aggregation	4	2	
PS9	Testdatenexploration, -bereinigung, -konditionierung	5	3	
PS10	Modelltest	2	2	
<b>Ergebnisnutzung</b>				
PS11	Ergebnisnutzung	4	3	
PS - Prozessschritt		$\Sigma$	37	34
		$\Sigma_{\text{norm}}$	0,673	0,62

**Bewertungsskala**

0	nicht vorhanden keine Qualifikation keine Erfahrung
⋮	⋮
5	vollständig vorhanden überragende Qualifikation sehr große Erfahrung

$$\Sigma_{\text{norm}} = \frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{max}}}$$

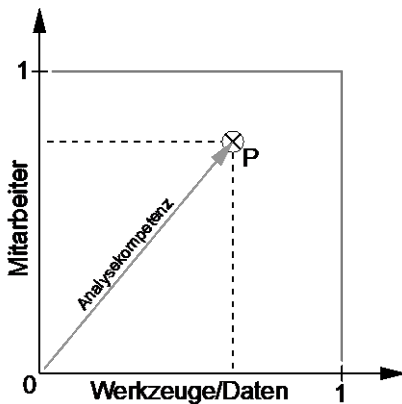
Tabelle 1: Die Bewertungstabelle zur Bestimmung der Analysekompetenz

Die Kategorie *Mitarbeiter* beschreibt, in wie weit die für den Prozessschritt notwendigen Qualifikationen und Erfahrungen im Unternehmen vorhanden sind.

Die Kategorien *Werkzeuge* und *Daten* beziehen sich auf die zur Durchführung des Prozessschritts benötigten Technologien und Daten. Auf eine Trennung der Kategorien *Werkzeuge* und *Daten* wird verzichtet, da nicht an allen Prozessschritten neue Daten beteiligt sind und die Datenweitergabe von einem Prozessschritt zum nächsten oftmals innerhalb der Werkzeuge realisiert wird. Die Bewertung kann daher auf die Daten, die Werkzeuge oder beides bezogen werden.

Die Bewertung der Kategorien erfolgt mit Hilfe einer Skala von 0 bis 5. Wird zum Beispiel die Kompetenz der Mitarbeiter oder die Verfügbarkeit der Daten als hoch eingeschätzt, werden hohe Punktzahlen vergeben. Die Bewertung erfolgt für jeden Prozessschritt durch das an diesem beteiligte Fachpersonal des Unternehmens.

Da alle Prozessschritte gleichermaßen erfüllt werden müssen, um ein Datenanalyseprojekt erfolgreich zu beenden, findet keine Gewichtung der Prozessschritte statt. Ist die Bewertung aller Prozessschritte erfolgt, werden die Punktschichten für *Mitarbeiter* und *Werkzeuge/Daten* ermittelt und über die maximal erreichbare Punktzahl normiert.



$$\text{Analysekompetenz} = \frac{\sqrt{\text{Mitarbeiter}^2 + \text{Werkzeuge/Daten}^2}}{\sqrt{2}}$$

Abbildung 4: Vergleichsdiagramm und Berechnungsformel der Analysekompetenz

Die Analysekompetenz des Unternehmens für das betrachtete Datenanalyseprojekt stellt den normierten Abstand der Position des Projektes zum Ursprung entsprechend der in Abbildung 4 gegebenen Formel dar.

Die getrennte Bewertung der Kategorien ermöglicht den Vergleich zwischen *Mitarbeiter* und *Werkzeuge/Daten* im Analysekompetenz-Vergleichsdiagramm (siehe Abbildung 4).

Die Projektposition im Vergleichsdiagramm lässt auf den Bedarf an Technologien, Daten oder Mitarbeiterqualifikationen schließen. Ziel ist es innerhalb des Diagramms Bereiche mit guter Mitarbeiterqualifikation und hoher technischer Ausstattung zu erreichen.

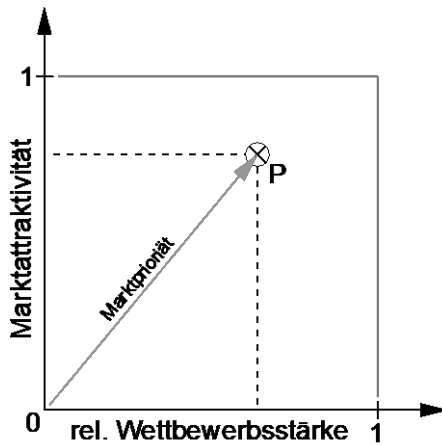
Sind innerhalb einer Prozessphase einzelne Prozessschritte deutlich schlechter bewertet als alle anderen Prozessschritte, handelt es sich um *kritische Prozessschritte* (siehe Tabelle 1). Eine Verbesserung der in *kritischen Prozessschritten* notwendigen Kompetenzen kann die Durchführung eines zunächst nicht machbaren Projekts ermöglichen.

### 3.2 Ermittlung der Marktpriorität

Für Produktinnovationen durch Datenanalysen sind sowohl technologische Aspekte als auch die unternehmerisch erreichbaren Erfolgsaussichten relevant. Die relative Marktrelevanz eines Datenanalyseprojekts wird durch die quantitative Größe der Marktpriorität ausgedrückt. Die Marktpriorität ermöglicht das Aufstellen einer Rangordnung verschiedener Analyseprojekte und hilft damit, folgende Frage zu beantworten:

*„Wie erfolgsversprechend ist das Datenanalyseprojekt aus unternehmerischer Sicht?“*

Maßgeblich für die Quantifizierung der Marktpriorität sind die mit dem Marktportfolio von MCKINSEY eingeführten und anerkannten Kriterien der *relativen Wettbewerbsstärke* und der *Marktattraktivität*. Die Kriterienbewertungen resultieren aus vorrangig quantitativen und qualitativen, betriebswirtschaftlichen Faktoren, deren Auswahl und Kombination nicht standardisiert sind.



$$\text{Marktpriorität} = \frac{\sqrt{\text{Marktattraktivität}^2 + \text{rel. Wettbewerbsstärke}^2}}{\sqrt{2}}$$

Abbildung 5: Vergleichsdiagramm und Berechnungsformel der Marktpriorität

Die *relative Wettbewerbsstärke* zeigt die unternehmensspezifische Ausgangssituation, zu deren Beschreibung u.a. die Kriterien Marktanteil, Umsatzentwicklung und Profitabilität dienen. Die *Marktattraktivität* repräsentiert im Gegensatz dazu die unternehmensexternen, d.h. nicht beeinflussbaren Rahmenbedingungen des Marktes, die u.a. durch die Kriterien Marktwachstum, Marktgröße, Wettbewerbsintensität, Markteintrittsbarrieren oder die Rohstoffverfügbarkeit bestimmt sind. Die Marktpriorität stellt den normierten Abstand der Position des Projektes zum Ursprung dar (siehe Abbildung 5). Die für die relative Wettbewerbsstärke und die Marktattraktivität genannten Faktoren lassen sich auch für ein Portfolio als Entscheidungsinstrument für Datenanalyseprojekte wie in Abbildung 5 dargestellt adaptieren. Demzufolge verspricht die Durchführung von Projekten mit einer hohen relativen Wettbewerbsstärke die Steigerung nicht zuletzt von Marktanteilen und der Umsatzerwartung für die durch Datenanalyse optimierten bzw. erweiterten Produkte.

Datenanalyseprojekte mit einer hohen Marktpriorität sind vorzuziehen, da diese durch ihr im Vergleich hohes Wachstumspotenzial, bei gleichzeitig geringem Aufwand und Risiko, den größten unternehmerischen Vorteil in Aussicht stellen.

#### 4 Die Auswertung des Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolios

Abbildung 6 zeigt das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio mit zwei Beispielprojekten ( $P_x$  und  $P_y$ ). Zu jedem Projekt wurden die Analysekompetenz und Marktpriorität entsprechend Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 ermittelt und in das Portfolio eingetragen. Das Portfolio ist in vier Bereiche unterteilt. Je nach Position der Projekte im Diagramm lassen sich Normstrategien formulieren.

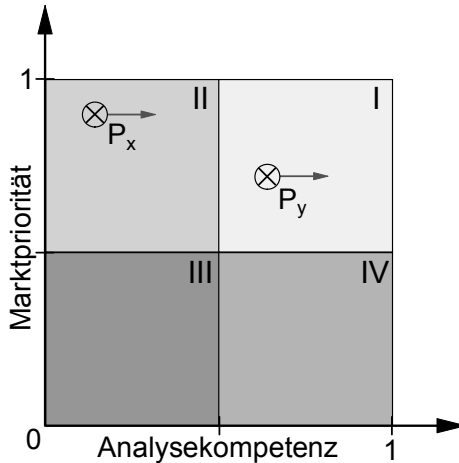


Abbildung 6: Das Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolio

Jedes Projekt bringt dem Unternehmen einen Mehrwert im Bereich der Mitarbeiterqualifikation, der Werkzeuge und Daten und steigert so die Analysekompetenz. Erworbene Analysekompetenz kann meist in nachfolgenden Projekten genutzt werden. Die damit verbundene hohe Dynamik des Portfolios hat vor allem Einfluss auf die Bereiche II und IV. Die vier Bereiche werden im Folgenden beschrieben und geeignete Normstrategien werden formuliert. Die Normstrategie sind als Empfehlungen zu verstehen, anhand derer differenziert Entscheidungen gefällt werden können.

##### I – Hohe Marktpriorität und hohe Analysekompetenz

Projekte in diesem Bereich sind aus unternehmerischer Perspektive attraktiv und mit moderatem Aufwand umsetzbar. Für diese Projekte gibt es eine klare Empfehlung zur Durchführung.



## II – Mittlere bis hohe Marktpriorität aber geringe bis mittlere Analysekompetenz

Diese Projekte besitzen einen großen Mehrwert am Markt. Ihre Durchführung stellt das Unternehmen jedoch noch vor größere Herausforderungen. Zwei Strategien sind hier denkbar:

6. Die Identifikation *kritischer Prozessschritte* innerhalb der Prozessphasen (siehe Kapitel 3.1) und den Einbezug externer Firmen, die eine Expertise in den zur Durchführung fehlenden Kriterien aufweisen.
7. Mit steigender Erfahrung im Bereich der Datenanalyse wird ein Unternehmen immer mehr Analysekompetenz aufbauen, sodass diese Projekte mit der Zeit immer weiter nach rechts in den Bereich I wandern und somit Kandidaten einer Durchführung werden. Diese Projekte sollten pausiert im Portfolio verbleiben.

## III – Geringe Marktpriorität und geringe Analysekompetenz

Projekte in diesem Bereich bedeuten großen Aufwand für das Unternehmen bei kleinem Nutzen am Markt. Diese Projekte sollten verworfen und aus dem Portfolio entfernt werden.

## IV – Geringe bis mittlere Marktpriorität und mittlere bis hohe Analysekompetenz

Projekte in diesem Bereich sind kritisch auf den Mehrwert zu prüfen, den eine Durchführung dem Unternehmen bringt. Überschneiden sich die erforderlichen Kompetenzen kritischer Prozessschritte zwischen diesem Bereich und Projekten aus Bereich II, kann die Durchführung dieser Projekte Vorläufer für attraktivere aktuell zu komplexe Projekte aus dem Bereich II sein. Gibt es keine Überschneidungen der *kritischen Prozessschritte*, ist die Entfernung der Projekte aus dem Portfolio zu diskutieren.

### 4.1 Ein Beispiel zur Dynamik der Projekte des Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolios

Ein Maschinenhersteller plant die Einführung effizienter prädiktiver Wartung auf Basis von ML. Dies erfordert eine ressourcenintensive Datenbereitstellung und -vorbereitung sowie die Anwendung moderner Analysemethoden.

Die Einführung wird daher als Datenanalyseprojekt betrachtet. Eine Bewertung der Marktpriorität zeigt eine hohe Kundennachfrage nach dieser Erweiterung. Auch war bis jetzt kein Mitbewerber in der Lage prädiktive Wartung mittels ML serienmäßig anzubieten. Die Ermittlung der Analysekompetenz des Unternehmens zeigt jedoch, dass es noch nicht bereit für die Umsetzung dieser Funktion ist. Es fehlen Kompetenzen und Technologien im Bereich der Datenakquise, Datenvorbereitung und Analyse. Auch sind die notwendigen Sensoren an den aktuellen Maschinen nicht verbaut. Die Einführung prädiktiver Wartung mittels ML kommt daher erst als Neuentwicklung für die nächste Maschinengeneration in Frage. Ein solches Projekt nimmt im Analysekompetenz-Markt-Portfolio die Position  $P_x$  im Bereich II ein (siehe Abbildung 6).

Als weiteres Datenanalyseprojekt plant das Unternehmen, die aktuell im Betrieb befindlichen Maschinen per Softwareupdate mit einer erweiterten Nutzerschnittstelle auszustatten (Anpassungsentwicklung). Die erweiterte Nutzerschnittstelle soll eine möglichst umfassende aber intuitive Übersicht über den aktuellen Zustand der Maschine liefern. Dazu werden vorhandene Sensorwerte derart aufbereitet, dass der Nutzer die Belastung auf die Hauptkomponenten der Maschine mit einem Blick kontrollieren kann. Er erhält zusätzlich Hinweise zur Parametereinstellung, die in der Folge zur Verringerung der Maschinenbelastung, weniger Stillstandszeiten und geringeren Kosten für den Betreiber führen.

Die Analysekompetenz des Maschinenherstellers wird in diesem Datenanalyseprojekt deutlich besser als  $P_x$  eingeschätzt. Die notwendigen Sensoren sowie Datenvorbereitungs- und Analysekompetenz sind durch die Erfahrungen während der Testphase der aktuellen Maschinengeneration zu Großteilen vorhanden. Eine Zusammenfassung der Analysen zu einer übersichtlichen Darstellung in der Nutzerschnittstelle und die Ableitung von Nutzungshinweisen wurde jedoch bisher nicht in Betracht gezogen. Im Laufe des Projektes wird zusätzlich ermittelt, ob weitere Rückschlüsse auf die Komponentenbelastung aus den Daten gezogen werden können und welche Sensoren fehlen, um ein noch umfassenderes Bild der Maschine zu erhalten.

Das zweite Projekt entspräche der Position von  $P_y$  im Bereich I des Analysekompetenz-Markt-Portfolio (siehe Abbildung 6). Es wird nach Empfehlung der Normstrategien durchgeführt.

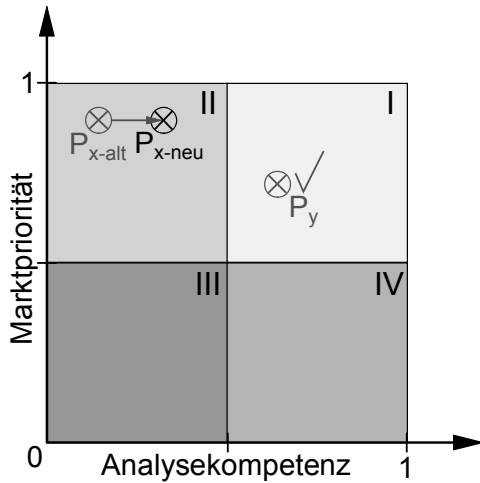


Abbildung 7: Beispiel der Entwicklung von Projekten innerhalb des Portfolios

Mit der Durchführung von  $P_y$  werden Erfahrungen gesammelt, die zur Durchführung von  $P_x$  nützlich sind.  $P_x$  wird anschließend neu bewertet. Die eigene Analysekompetenz wird nun auf Grundlage der Erfahrungen aus  $P_y$  höher eingeschätzt.  $P_x$  wandert im Analysekompetenz-Markt-Portfolio nach rechts (siehe Abbildung 7).

Auch wenn  $P_x$  noch nicht den Bereich I erreicht hat, wird die Durchführung mit den Erfahrungen aus Projekt  $P_y$  und einer Kooperation mit externen Firmen in den kritischen Prozessschritten möglich.

## 5 Diskussion

Mit Hilfe des vorgestellten Analysekompetenz-Marktpriorität-Portfolios lassen sich Datenanalyseprojekte bewerten und miteinander vergleichen. Die Bewertung der Analysekompetenz legt einen starken Fokus auf den Analyseprozess. Dies hat den Vorteil, dass der gesamte Prozess vorgedacht werden muss und es zu einer breiten Auseinandersetzung mit den Projekten im Unternehmen kommt. Zentrale Herausforderungen bei der Umsetzung werden auf diese Weise frühzeitig erkannt.

Zur realistischen Bewertung der Datenanalyseprojekte müssen die innerhalb der Prozessschritte notwendigen Mitarbeiterqualifikationen, Werkzeuge und

Daten bekannt sein. Dies kann speziell zu Beginn der Einführung komplexer Datenanalysen in die Produktentwicklung zu Problemen führen.

Die beschriebenen Normstrategien gewährleisten, dass zunächst machbare Projekte mit erkennbarem Nutzen in Betracht gezogen werden. Diese Projekte besitzen neben einer hohen Analysekompetenz auch eine signifikante Marktpriorität (Bereich I, Abbildung 6). Dieses Vorgehen führt zu einem sukzessiven Ausbau der Analysekompetenz, sodass mit der Zeit Projekte aus dem Bereich II in den Bereich I wandern und damit durchgeführt werden können. Die Einführung komplexer Datenanalysen in ein Unternehmen anhand machbarer Projekte mit signifikantem Mehrwert ist eine in der Literatur häufig empfohlene Vorgehensweise (LaValle et al. 2011, Vanauer et al. 2015).

Aufgrund der sich mit jedem durchgeführten Projekt verändernden Analysekompetenz sollten die Datenanalyseprojekte regelmäßig neu evaluiert werden, um vorher zu schwierige Projekte nun in den Fokus zu nehmen.

## Literaturverzeichnis

- Bitkom e.V., DFKI–Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (2017): Künstliche Intelligenz, Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung. [https://www.dfki.de/fileadmin/user\\_upload/import/9744\\_171012-KI-Gipfelpapier-online.pdf](https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/import/9744_171012-KI-Gipfelpapier-online.pdf), abgerufen am 05.03.2019
- BMWi–Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2019: Innovationswettbewerb „Künstliche Intelligenz als Treiber für volkswirtschaftlich relevante Ökosysteme“. [https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Kurzmeldungen/Aktuelles/2019/DT/2018\\_01\\_25\\_DT\\_Kuenstliche\\_Intelligenz.html](https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Kurzmeldungen/Aktuelles/2019/DT/2018_01_25_DT_Kuenstliche_Intelligenz.html), abgerufen am 05.03.2019
- Cato, P., Gölzer, P., Demmelhuber, W. (2015): An Investigation into the Implementation Factors affecting the Success of Big Data Systems. In: 2015 11th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT). doi.org/10.1109/INNOVATIONS.2015.7381528
- Fraunhofer Gesellschaft 2018: Maschinelles Lernen – Kompetenzen, Anwendungen und Forschungsbedarf. [https://www.bigdata.fraunhofer.de/content/dam/bigdata/de/documents/Publikationen/BMBF\\_Fraunhofer\\_ML-Ergebnisbericht\\_Gesamt.pdf](https://www.bigdata.fraunhofer.de/content/dam/bigdata/de/documents/Publikationen/BMBF_Fraunhofer_ML-Ergebnisbericht_Gesamt.pdf), abgerufen am 05.03.2019
- Klement, S., Saske, B., Arndt, S., Stelzer, R. (2018): Prozessmodell für Datenanalysen in der Produktentwicklung. In: Brökel, K., Corves, B., Grote, K.-H., Lohrengel, A., Müller, N. et al. (Hrsg.): Digitalisierung und Produktentwicklung - vernetzte Entwicklungsumgebungen. 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. S. 168–179, Bayreuth, ISBN 978-3-00-059609-4

- LaValle, S., Lesser, E., Shockley, R., Hopkins, M. S., Kruschwitz, N. (2011): Big Data, Analytics and the Path From Insights to Value. In: MITSloan Management Review 52 (2), S. 21–32
- NIST 2018a: Big Data Interoperability Framework, Volume 1 – Definitions. National Institute of Standards and Technology
- NIST 2018b: Big Data Interoperability Framework, Volume 3 – Use Cases and General Requirements. National Institute of Standards and Technology
- Saltz, J. S., Shamschurin, I. (2016): Big Data Team Process Methodologies. In: 2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). doi.org/10.1109/BigData.2016.7840936
- Saltz, J. S.; Grady, N. W. (2017): The Ambiguity of Data Science Team Roles and the Need for a Data Science Workforce Framework. In: 2017 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). doi.org/10.1109/BigData.2017.8258190
- Shearer, C. 2000: The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. In: Journal of Data Warehousing, 5, 13 - 22
- Vanauer, M., Böhle, C., Hellingrath, B. (2015): Guiding the Introduction of Big Data in Organizations. A Methodology with Business- and Data-Driven Ideation and Enterprise Architecture Management-Based Implementation. In: 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences.
- Volk, M., Bosse, S., Turowski, K. (2017): Providing Clarity on Big Data Technologies. In: 2017 IEEE 19<sup>th</sup> Conference on Business Informatics (CBI). doi.org/10.1109/CBI.2017.26
- Wilberg, J., Fahrmeier, L., Hollauer, C., Omer, M. (2018): Deriving a Use Phase Data Strategy For Connected Products - A Process Model. In: International Design Conference - DESIGN 2018. doi.org/10.21278/idc.2018.0213

## Kontakt

Dipl.-Ing. Sebastian Klement  
*sebastian.klement@tu-dresden.de*

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph H. Stelzer  
 Professur für Konstruktionstechnik/CAD  
 TU Dresden  
 George-Bähr-Straße 3c  
 01069 Dresden  
<https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/imm/ktc>



# Einsatz von Graphdatenbanken für das Produktdatenmanagement im Kontext von Industrie 4.0

Christopher Sauer, Benjamin Schleich und Sandro Wartzack

## Einleitung und Motivation

Im Zuge der digitalen Transformation im Kontext von Industrie 4.0 tun sich eine Vielzahl neuer Datenquellen auf, die im Produktdatenmanagement berücksichtigt werden müssen. Ein Beispiel neuer Datenquellen sind Daten der Industrie 4.0, die zum Beispiel über Sensoren in der Fertigung erhoben werden. Kennzeichen dieser Datenquellen sind die zunehmende Heterogenität der Daten, die nicht mehr in einer Tabelle erfasst werden können. So könnten dies unter anderem Bilder einer optischen Bauteilprüfung sein oder Code zur Bauteilprüfung. Dieser Umstand führt zum Aufbau vieler einzelner neuer Silos, in denen die Daten separat und getrennt vom PDM-System verarbeitet werden müssen. Zudem werden dort abgeschottet von den restlichen Silos Daten gespeichert. Daneben führt eine Vielzahl neuer Autorensysteme (Prüfsoftware, Kundenmanagement, Anforderungsmanagement) zu einer gesteigerten Datenmenge, die nicht mehr in klassischen tabellenbasierten und rein-relationalen Datenbanksystemen sinnvoll erfasst werden können. Um an Informationen zu gelangen, sind im Fall rein-relationaler Datenbanksysteme oft komplizierte Abfragen nötig. Diese greifen dann auf mehrere unterschiedliche Tabellen innerhalb der Datenbank zu und stellen daraus wiederum relevante Informationen bereit. Je mehr größer jedoch diese Datenbanken werden und je mehr Informationen miteinander relational verbunden werden müssen, desto mehr Expertenwissen über das jeweilige Datenbanksystem wird benötigt. Somit büßen rein-relationale (SQL-basierte) Systeme auch einen Großteil der Vorteile ihres logischen strukturellen Aufbaus ein. Um den oben genannten Problemen zu begegnen, können neue Ansätze aus dem Bereich der Linked Data herangezogen werden. Bei

Linked Data werden nicht nur die reinen Daten verwendet, sondern auch beschreibende und verknüpfende Informationen um die Daten zu interpretieren verwendet und weitergegeben. Durch diesen Mehrwert an Information wird es in einem ersten Schritt möglich, heterogene Produkt- und Prozessdaten, also Daten aus verschiedensten Quellen, wie zum Beispiel Konstruktion, Simulation und Qualitätssicherung, miteinander zu verknüpfen. Durch diese Verknüpfung kann eine höherwertige Darstellungsform geschaffen werden, die neben den reinen Daten auch die sinnvolle Verknüpfung enthält und so eine semantisch höherwertige Repräsentation darstellt. Die so entstehende, vernetzte Datenbank kann z.B. über eine graphenorientierte Datenbank oder Graphdatenbank implementiert werden.

Im vorliegenden Beitrag wird untersucht, inwieweit die Modellierung mit gegenwärtig existierenden Lösungen für Graphdatenbanken möglich ist. Ausgehend von einem Beispiel mit einem vereinfachten Produkt- und Prozessdatenmodell der Blechmassivumformung, wird eine allgemeine Methode vorgestellt, durch die ein SQL-basiertes Datenbanksystem in eine Graphdatenbank überführt werden kann. Anhand dieser Methode wird dargestellt, wie bestehende Lösungen teilweise auch parallel zu neuartigen Linked Data Datenbanken existieren können, um diese Schritt für Schritt in eine Graphdatenbank zu überführen. Die Ergebnisse des Beitrags sind auf der einen Seite das allgemeine Vorgehensmodell zur Einführung von Graphdatenbanken und auf der anderen Seite Aussagen über die Nutzbarkeit der vorgestellten Lösung für das Produkt- & Prozessdatenmanagement.

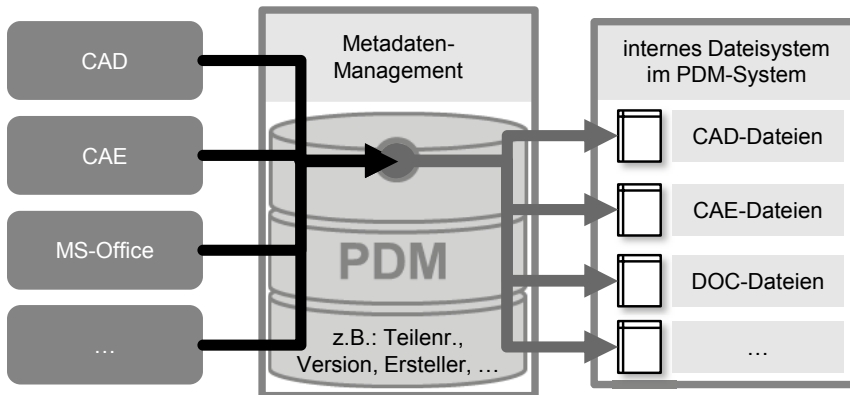
## **Grundlagen und Stand der Technik**

### **1.1 Produktdatenmanagement**

Gegenwärtige Produktdatenmanagement-Systeme (PDM) verwalten die Produktstruktur und deren zugrundeliegende Daten hierarchisch und statisch (Conrad et al. 2007). Dabei steht das Projekt an oberster Stelle der Struktur, gefolgt von Produkten, die sich dann jeweils in einzelne Baugruppen gliedern. Mit dieser Struktur lassen sich vor allem CAD-Daten sehr gut verwalten, da CAD-Modellbäume ähnlich hierarchisch und statisch aufgebaut sind, wie aktuelle PDM-Systeme. Hier ist schon erkennbar, dass für die Integration von weiteren Daten, neue Funktionen im PDM-System notwendig sind, um zum



Beispiel einen anderen strukturellen Aufbau zu unterstützen als die oben genannten Hierarchien. Dabei ist es zum Beispiel möglich, CAE-Daten mit der zugehörigen CAD-Geometrie zu verknüpfen. Die CAE-Eingangsdaten werden dabei semantisch an die CAD-Geometrie gekoppelt. Darüber hinaus stellen nach Eigner & Stelzer (2009) PDM-Systeme unter anderem folgende Funktionalitäten bereit: Datenstrukturmanagement, Versionsverwaltung, Projektmanagement, Arbeitsablauf- und Prozessverwaltung. Gerade die Integration von Arbeitsabläufen und Prozessen ermöglicht neben dem reinen Produktdatenmanagement auch das Management von unternehmensinternen Prozessen. Dabei stehen vor allem Geschäftsprozesse, wie ein Zeichnungsfreigabeprozess oder ein Angebotserstellungsprozess im Fokus. Grundsätzlich werden durch PDM-Systeme alle Informationen, die im Produktentstehungsprozess anfallen, transparent und nachvollziehbar abgelegt und miteinander verknüpft (Vajna et al. 2018). Gegenwärtig erfolgt diese Verknüpfung über die Definition von Metadaten, siehe Abbildung 1. Zu verknüpfende Informationen können dabei zum Beispiel CAD-Daten, Anforderungslisten oder Simulationsdaten sein. Die zur Verknüpfung verwendeten Metadaten sind vor allem Daten, wie etwa die Teilenummer, der Ersteller oder die aktuelle Versionsnummer des Bauteils. Die gesamte Datenverwaltung wird dabei meist über ein SQL-basiertes relationales Datenbankmanagementsystem realisiert.



## 2.2 Datenbanken

Die Grundlage aktueller Produktdatenmanagement-Systeme bilden in der heutigen Zeit meist relationale Datenbanksysteme von großen Herstellern wie Microsoft, Oracle, usw. (Vajna et al. 2018). In relationalen Datenbanksystemen werden die einzelnen Tupel in Tabellenform gespeichert. Ein Tupel kann dabei wie ein Datensatz betrachtet werden. Darüber hinaus werden die einzelnen Tabellen dann über Schlüssel miteinander verknüpft. Die eindeutige Zuordnung zwischen den einzelnen Elementen der Tabellen findet dann mithilfe dieser Schlüssel statt. Innerhalb dieser Tabellen werden später Abfragen oder Transaktionen erstellt und durchgeführt. Dies geschieht anhand sogenannter Metadaten, welche die Informationen über die gespeicherten Daten beinhalten. Neben den Abfragen an eine Datenbank, bei denen gezielt Datensätze aus der Datenbank abgefragt werden können, sind Transaktionen eine weitere wichtige Funktion. Unter einer Transaktion werden verschiedene Interaktionen wie Speichern, Löschen oder Verändern von Datensätzen verstanden (Wiese 2015). Nach Wiese (2015) erstreckt sich eine Transaktion immer von einem konsistenten Zustand zum nächsten. Somit sind alle Bedingungen einer ACID gemäßen Datenbank nach Maier & Kaufmann (2016) gegeben.

- Atomarität (Atomicity) – eine Transaktion wird entweder komplett durchgeführt oder überhaupt nicht
- Konsistenz (Consistency) – nach Ende einer Transaktion müssen alle vordefinierten Konsistenzbedingungen auch wieder erfüllt sein
- Isolation (Isolation) – gleichzeitig ablaufende Transaktionen führen zu denselben Resultaten wie in einer Einbenutzerumgebung
- Dauerhaftigkeit (Durability) – Datenbankzustände können nur durch Transaktionen verändert werden

Für relationale Datenbanken gelten diese vier Bedingungen immer. Aufgrund ihrer hohen Verbreitung sind relationale Datenbanken immer noch der quasi-Standard im Einsatz befindlicher Datenbanksysteme.

### 2.3 Graphenorientierte Datenbanken oder Graphdatenbanken

Graphdatenbanken wurden zusammen mit anderen neuartigen und postrelationalen Datenbanken aufgrund folgender Schwächen relationaler Datenbanken entwickelt (Wiese 2015).

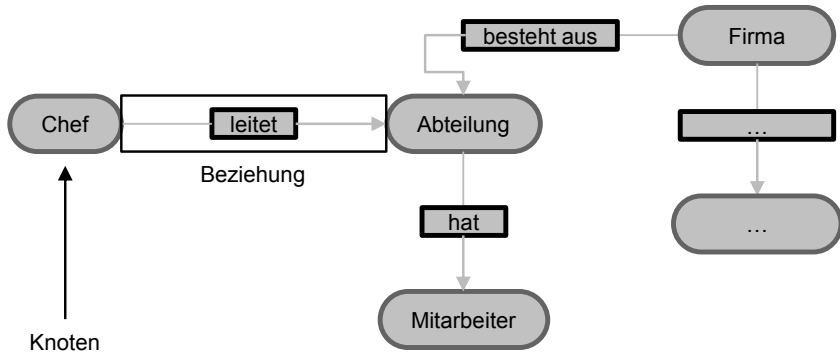
- Inadäquate Repräsentation von beliebigen Daten – die strikte Konvention Daten nur tabellarisch zu erfassen, ist nicht für jeden Anwendungstyp geeignet.
- Semantische Überbeschreibung – relationale Datenbanken müssen sowohl die Instanzen als auch deren Beziehungen tabellarisch erfassen, so entstehen unnötig viele Tabellen zur Beschreibung der direkten Beziehungen mit Hilfe von Beziehungstabellen und Schlüsseln
- Schwache Unterstützung für rekursive Anfragen – Datenbankanfragen, die verschiedene Datensätze rekursiv zueinander in Beziehung setzen müssen, benötigen relativ lange für diese Aufgabe
- Zwang zur Homogenität – Datensätze müssen immer alle Attribute der Tabelle belegen

Zudem erkennt Maier & Kaufmann (2016), dass der Aufwand zur Ermittlung von referenzierten Tupel in relationalen Datenbanken mit der Anzahl der Tupel wächst, dies ist für andere Datenbanktypen wie Graphdatenbanken nicht der Fall, da bei diesen die direkten Nachbarn immer abgefragt werden können und nicht vorher alle Relationen durchlaufen werden müssen. Die oben aufgeführten Schwächen führten in den letzten Jahren unter anderem zur Entwicklung von NoSQL-Datenbanken und speziell Graphdatenbanken. Dabei werden Daten innerhalb einer mathematischen Struktur, dem namensgebenden Graphen abgelegt. Dies bringt nach Angles & Gutierrez (2008) unter anderem folgende Vorteile mit sich.

- Die Daten werden natürlich modelliert. Dieser Umstand bezieht sich auf die einfache Formulierung von Graphen, so kann ein Datenbankmodell auch von auf diesem Gebiet Produktentwicklern, ohne vertieftes PDM Wissen schnell an einem Whiteboard entworfen und später umgesetzt werden.
- Bei Abfragen kann direkt auf die Datenstruktur zugegriffen werden, auch müssen keine Relationen durchlaufen werden

- Es sind effiziente Graph-Algorithmen aus dem Gebiet der mathematischen Graphentheorie verfügbar. Zum Beispiel zur Suche der kürzesten Verbindung zwischen zwei Knoten

Grundsätzlich speichert eine Graphendatenbank Informationen und Daten anhand von Knoten und Kanten wie in Abbildung 2 zu erkennen ist.



Im Beispielmmodell aus Abbildung 2 lässt sich die natürliche Modellierung besonders gut erkennen. So ist diese als recht intuitiv zu betrachten, in einer relationalen Datenbank müssten die einzelnen Datensätze über Beziehungstabellen und Schlüssel miteinander verknüpft werden, in einer Graphdatenbank erfolgt diese Modellierung direkt über die Kanten des zugrundeliegenden Graphens.

### 3 Vorgehensmodell zur Einführung von Graphdatenbanken

#### 3.1 Problemstellung

Für das in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehensmodell wurde ein Anwendungsfall aus dem Bereich der Blechmassivumformung gewählt. Bei der Blechmassivumformung handelt es sich um ein neuartiges Fertigungsverfahren, das die Vorteile der Blechumformung mit der Massivumformung vereint (Hetzner et al. 2011). Für die Blechmassivumformung wurde zur Erfassung aller relevanten Fertigungs-, Produkt- und Prozessdaten ein Datenbankmodell für die Ablage entwickelt. Innerhalb der Beiträge von Breitsprecher et al.

(2011 und 2014) ist dabei ein rein-relationales Produkt- und Prozessdatenmodell (PPDM) entstanden. Ein Ausschnitt des Datenbankschemas, also der zugrundeliegenden Formulierung ist in Abbildung 3 zu sehen. Umgesetzt wurde diese Datenbank mit der Datenbanksoftware Sqlite, die die Funktionalität einer relationalen Datenbank wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, implementiert.

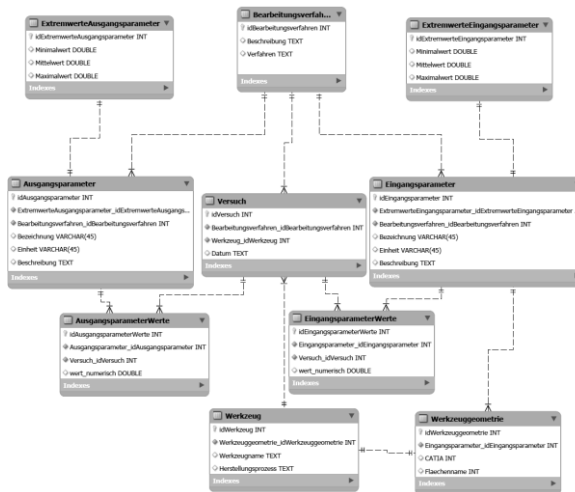


Abbildung 3: Schema des Produkt- und Prozessdatenmodells für die BMU (Breitsprecher 2014)

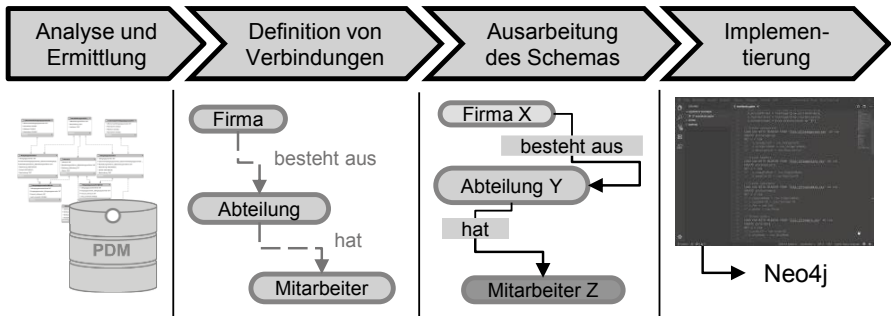
Aufgrund der Erkenntnis, Daten nicht mehr rein-relational erfassen zu können, also zum Beispiel Bilddateien oder orts aufgelöste Metamodelle (Sauer 2018), benötigt dieses Datenbankmodell jedoch eine Erneuerung. Die zu erfassenden Daten sind nicht mehr im klassischen Schema der relationalen Datenbank ablegbar und über die zahlreichen Referenz-IDs in Beziehungstabellen (Schlüssel) immer unübersichtlicher geworden. Zudem wird ein Einfügen neuer, bisher unbekannter Datenquellen immer schwieriger, da das bestehende Schema bei jeder Ergänzung neu migriert werden muss. In einem ersten Schritt soll in diesem Beitrag eine Eignung von Graphdatenbanken überprüft werden. Der vorliegende Anwendungsfall soll sich aber nicht nur auf die Blechmassivumformung alleine beschränken, sondern eine allgemeine Vorgehensweise zur Einführung oder Übertragung von relationalen Datenbankmodellen in eine Graphdatenbank darstellen. Graphdatenbanken kommen aufgrund der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Vorteile zum Einsatz,

da eine möglichst flexible und natürliche Formulierung der Datenstruktur für den Erfolg als essentiell erachtet wird.

### 3.2 Vorgehen

Grundsätzlich lässt sich das Vorgehen in vier Schritte unterteilen. Abbildung 4 dient zur Verdeutlichung dieser Abfolge:

- Schritt 1: Analyse und Ermittlung: Zu erfassenden Daten und Datenquellen erkennen und Tabellen extrahieren
- Schritt 2: Definition von Verbindungen: Relationen innerhalb der in Schritt 1 erfassten Daten und Datenquellen herausstellen
- Schritt 3: Ausarbeitung des Schemas: Erfassung zugrundeliegender Graphdatenbankstruktur und Anlegen erster Knoten
- Schritt 4: Implementierung: Anlegen der kompletten Graphdatenbank innerhalb einer Graphdatenbanksoftware (hier: Neo4j)



Für eine komplette Neueinführung von Graphdatenbanken werden dabei alle vier Schritte durchlaufen. Handelt es sich lediglich um eine Überführung einer bestehenden relationalen Datenbank in eine graphenorientierte können gegebenenfalls die Schritte eins und zwei entfallen. Für die Überführung lassen sich zwei hilfreiche Überführungsregeln erkennen: Eine Reihe oder ein Datensatz einer relationalen Datenbank ist immer ein Knoten in der resultierenden Graphdatenbank. Ein Tabellenname einer relationalen Datenbank ist meist eine Bezeichnung für eine Kante innerhalb einer graphenorientierten Datenbank. Es lohnt sich auch in der Überführung nochmals grundlegend zu analysieren ob die beiden obigen Regeln zum Einsatz kommen können.

Ausgehend vom Einführungsfall werden im ersten Schritt alle zugrundeliegenden Daten erfasst. Im Fall der Blechmassivumformung sind es vor allem die Folgenden:

- Werkzeugkonzept (Wz.-Konzept) – welches Werkzeug wird für die Herstellung verwendet. Darunter lassen sich folgende Informationen erfassen: Name des Werkzeugs, Beschreibung des Werkzeugs, Prozessfolge, Schrittzahl (Wie viele Arbeitsschritte werden auf dem Werkzeug ausgeführt)
- Halbzeugkonzept (Hz.-Konzept) – welches Halbzeug wird für die Herstellung eines Bauteils verwendet? Dies umfasst: Name des Halbzeugs und Beschreibung, eventuell auch Rückschlüsse über den Vendor (wenn zum Beispiel eine Anbindung an ein ERP System vorhanden ist)
- Fertigungsverfahren – das zum Einsatz kommende Fertigungsverfahren, welches Werkzeug und Halbzeug zusammenbringt, um ein Bauteil zu erzeugen. Hierunter fällt: Name des Fertigungsverfahrens, Beschreibung des Fertigungsverfahrens und ggf. verfügbare Fertigungsmaschinen.
- Bauteil – das Bauteil welches gefertigt werden soll. Hierfür lassen sich der Name, eine Beschreibung, ein Versionsstand (Verknüpfung mit CAD-Dateien) und ggf. eine Konfiguration der Elemente erfassen.
- Formelemente – eine spezifische Größe für die Blechmassivumformung. Bauteile besitzen immer eines oder mehrere Formelemente. Hierunter lassen sich der Name, die Bezeichnung, die Art (Hauptformelemente entsprechen Massivteilen, Nebenformelemente entsprechen Blechteilen) und eine Parameterkonfiguration der Geometrie erfassen.
- Zusatzeigenschaften – etwaige Zusatzeigenschaften eines Bauteils, die durch spezifische Fertigungsprozess- oder Materialeigenschaften entstehen. Informationen wie Name und Beschreibung sowie Wert der Zusatzeigenschaften können hierunter erfasst werden.
- Versuch – werden Bauteile zum ersten Mal gefertigt, benötigen diese einen Versuch, der die Bauteileigenschaften validiert. Dabei

kann der Versuch sowohl experimentell als auch numerisch/simulativ durchgeführt werden. Im Versuch werden Zielgrößen betrachtet, basierend auf den Eingangsparametern, die meist durch Geometriegrößen ausgedrückt werden.

- Versuchsdaten – entstehen aufgrund eines Versuchs und enthalten für die vorher definierten Zielgrößen gefundene Werte, Parameternamen und weitere Ergebnisse.
- Metamodelle – Anhand von Versuchsdaten werden Vorhersagemodelle trainiert, die auf Basis bekannter Versuchspunkte bisher unbekannte neue Versuchspunkte vorhersagen können, dies umfasst auch die oben erwähnten lokalen Metamodelle. Diese enthalten ihren Namen, Beschreibung, einen Pfad innerhalb einer Datenablage, ein Qualitätskriterium zur Beschreibung der Vorhersagegüte und die eigentliche erzielte Vorhersagegüte nach dem Aufbau des Metamodells.

Ist die Analyse der zu erfassenden Datenquellen abgeschlossen, werden im nächsten Schritt Relationen und Beziehungen zwischen den Daten beschrieben. Hierzu wird grundlegend versucht, die Erkenntnisse aus der unstrukturierten Analyse weiter zu strukturieren. Im vorliegenden Fall wurden unter anderem folgende Beziehungen identifiziert.

- Werkzeug- und Halbzeugkonzept beeinflussen das Fertigungsverfahren, bzw. definieren auch die Anzahl und Art der zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren
- Bauteile besitzen Formelemente und Zusatzeigenschaften
- Fertigungsverfahren wirken sich auf den Versuch aus
- Formelemente und Zusatzeigenschaften der Bauteile bedingen die im Versuch zu erhebenden Größen
- Versuche liefern Versuchsdaten
- Versuchsdaten erzeugen Metamodelle

Es ist zu erkennen, dass schon anhand der wörtlichen Formulierung erste Beziehungen zwischen den Größen erkennbar sind.

In Schritt drei sollen diese nun in eine grafische Form überführt werden, dies kann zum Beispiel über Diagramme geschehen. Das aus den bisherigen Erkenntnissen gewonnene Diagramm ist in Abbildung 5 zu erkennen.



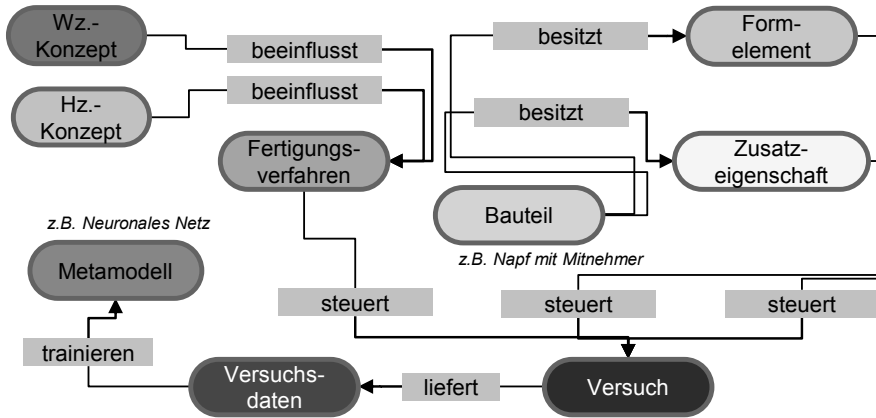


Abbildung 5: Schema der Graphdatenbank

Anhand des in Abbildung 5 dargestellten Schemas kann nun in Schritt vier in die Implementierung der Graphdatenbank übergegangen werden. Im vorliegenden Beitrag ist dies mit der Graphdatenbanksoftware Neo4j durchgeführt worden. Ist Graphdatenbank erzeugt und mit Datensätzen befüllt worden, lohnt ein Blick auf die Abfragemöglichkeiten der zugrundeliegenden Daten.

### 3.3 Abfragen

Um eine Abfrage wie in Abbildung 6 zu erzeugen, bei der gezielt auf die mit einem Versuch zusammenhängenden Knoten eingegangen wurde, werden Abfragesprachen benötigt. Neo4j unterstützt dabei die quasi Standardsprache GraphQL (Graph Query Language): GraphQL macht es dabei möglich, die Abfragen ebenfalls in einer graphenartiger Struktur zu verfassen, dadurch bleibt die Abfrage innerhalb der grapheigenen Syntax (He & Singh 2010). Eine beispielhafte Abfrage, um die Versuchsbeschreibung für Versuchs #1 zu erhalten, könnte in GraphQL lauten:

```

{
  "Versuch#1"{
    Versuchsbeschreibung
  }
}

```

Die Abfrage würde dann die entsprechende Versuchsbeschreibung zu Versuch#1 zurückgeben und dem Benutzer oder der Anwendung zur Verfügung stellen. Das in diesem Beitrag eingesetzte Neo4j unterstützt neben GraphQL auch die Abfragesprache Cypher, diese wurde extra für Graphdatenbanken innerhalb von Neo4j entwickelt (Wiese 2015). Cypher orientiert sich dabei eher am klassischen SQL, so verwendet es eine ähnliche Syntax. Sowohl mit GraphQL als auch mit Cypher lassen sich ähnliche Abfragen realisieren, übersetzt man die abgefragten Daten in ihre bildliche Form, entsteht zum Beispiel eine Struktur wie in Abbildung 6.

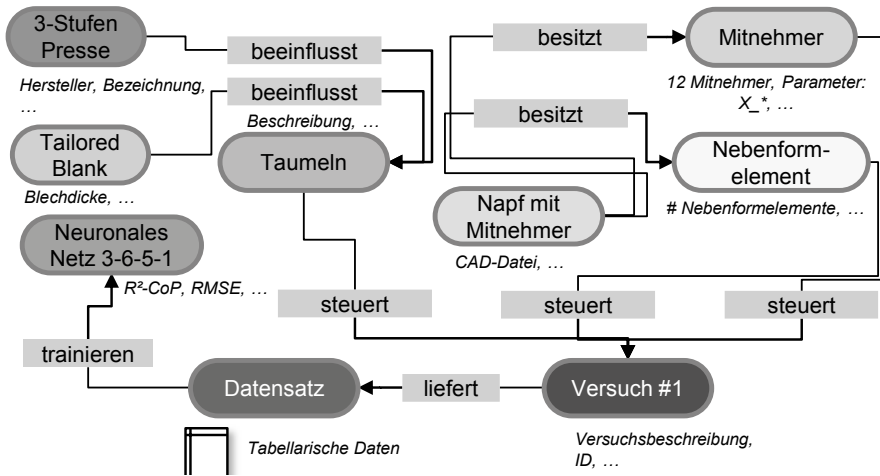


Abbildung 6: Resultierender Graph (durch Abfrage eines Versuchsknotens „Versuch#1“ und aller verknüpften weiteren Knoten erzeugt)

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Abfragen ähnlich flexibel sind wie mit bestehenden SQL-basierten Systemen. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Sprache GraphQL, da sie aufbauend auf der grapheigenen Syntax Abfragen ermöglicht, so entfallen Schlüsselwörter und Sprachkonstrukte wie sie SQL und Cypher vorsehen.

## 4 Bewertung und Diskussion

### 4.1 Bewertung der Nutzbarkeit

Im Rahmen dieses Beitrags hat sich herausgestellt, dass Graphdatenbanken neue Wege in der Entwicklung von Produkt- und Prozessdatenmodellen aufzeigen können. Dabei können schnell und unkompliziert komplette Datenbanken implementiert werden und auch eine Änderung und Anpassung an neue Gegebenheiten wird ermöglicht. Gerade im Kontext von Industrie 4.0, unter welchem viele neue Datenquellen an ein bestehendes System angebunden werden wollen, ist die Verwendung von Graphdatenbanken nötig. Ein Vorteil von Graphdatenbanken ist ihre Unterstützung für neue Datentypen, wie der angesprochenen lokalen Metamodelle, diese basieren auf neuronalen Netzen, welche mit Hilfe ihrer Struktur und ihrer Gewichte innerhalb der Graphdatenbank erfasst werden können. Dabei wird ein direkter Zugriff ermöglicht. Darüber hinaus wird es den Produkt- und Prozessentwicklern aufgrund der weniger aufwendigen Struktur der Datenbank möglich, ohne vertiefte Kenntnisse in Datenbanktechnik neue Modelle zu entwickeln. Die „Whiteboard“-freundliche Formulierung von Graphdatenbanken vereinfacht zudem Kommunikation und Austausch der Mitarbeiter und PDM-Verantwortlichen über das zugrundeliegende Datenbankmodell.

### 4.2 Integration in bestehende Umgebungen

Wie anfangs erwähnt verwenden bestehenden PDM-Systeme rein-relationale SQL-basierte Datenbanken. Dieser Umstand wird sich aufgrund der bewährten Technologie auch in der kommenden Zeit nur langsam ändern. Für neuartige Systeme und Produkt- und Prozessdatenmodelle lohnt jedoch ein Blick auf die Graphdatenbanken. So ist es durchaus denkbar, dass sich bestehende PDM-Systeme über Graphdatenbanken erweitern lassen, um zum Beispiel die angesprochene Flexibilität in der Anbindung neuer Datenquellen zu ermöglichen.

## 5 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich Graphdatenbanken für den Einsatz zur Produkt- und Prozessdatenverwaltung grundsätzlich eignen. Der in die-

ser Arbeit vorgestellte Ansatz dient für einen ersten Versuch ein SQL-basiertes Modell in eine Graphdatenbank zu überführen. Die Stärke von SQL-basierten Datenbanken, die in den Grundlagen vorgestellten ACID-Transaktionen, werden aus Sicht der Autoren eher bedingt im PDM-Bereich benötigt. Wohlüberlegte Graphdatenbanken sind aufgrund ihrer Flexibilität und Anpassbarkeit für eine Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten geschaffen. Hierfür sind Graphdatenbanken prädestiniert, da diese in Anlehnung zu den Programmiersprachen eine Formulierung angelehnt an eine Hochsprache erlauben. SQL-basierte Modelle zeichnen sich demgegenüber durch einen höheren Programmier- und Instandhaltungsaufwand und eine geringe Flexibilität aus. Für die Zukunft sollte das hier vorgestellte Modell weiter auf seine Eignung im produktiven PDM-Einsatz untersucht und ausgebaut werden. PDM-Systeme werden auf lange Sicht nicht ohne den Einsatz oder der teilweisen Unterstützung von graphbasierten Datenbankmodellen auskommen, da vor allem eine Unterstützung der oben genannten Datenquellen unter dem Kontext Industrie 4.0 immer wichtiger wird. Jedoch wird auch die Kompatibilität zu SQL-basierten Modellen nicht einfach wegfallen können, so dass in Zukunft wahrscheinlich beide Systeme parallel existieren und eine Interoperabilität immer wichtiger wird.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Teilprojekts B1 „Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems“ im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 73.

## Literaturverzeichnis

- Abramovici, M, Gerhard, D (1997): Use of PDM in Improving Design Processes – State of the Art, Potentials and User Perspectives. In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED) 1997, Tampere. Design Society.
- Angles, R, Gutierrez, C (2008): Survey of graph database models. In: ACM Computing Surveys (CSUR), 40 (1). <https://doi.org/10.1145/1322432.1322433>
- Breitsprecher, T, Meinel, A, Thummet, M, Wartzack, S (2014): Produkt- und Prozessdatenmodellierung im Kontext der Blechmassivumformung. In: Entwerfen Entwickeln Erleben – EEE2014 (551 – 564). Dresden: Verlag der Wissenschaften.

- Breitsprecher, T, Westphal, C, Meintker, N, Wartzack, S (2011): Formalisierung und Verwaltung von Entwicklungswissen im Kontext des Integrierten Produktmodells. In: Tagungsband 22. DfX Symposium. Hamburg: TuTech Verlag. <https://www.designsociety.org/publication/32437/>
- Conrad, J, Deubel, T, Köhler, C, Wanke, S, Weber, C (2007): Comparison of Knowledge Representation in PDM and by Sematic Networks. In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Engineering Design (ICED) 2007, Paris. Design Society. <https://www.designsociety.org/publication/25624/>
- Eigner, M, Stelzer R (2009): Product Lifecycle Management. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/9783672>
- He, H, Singh, A. K. (2010): Query language and access methods for graph databases. In: In: Aggarwal, C.C., Wang, H. (Hrsg.) Managing and Mining Graph Data, S. 125–160. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6045-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6045-0_4)
- Hetzner, H, Koch, J, Tremmel, S, Wartzack, S, Merklein, M (2011): Improved Sheet Bulk Metal Forming Processes by Local Adjustment of Tribological Properties. In: JMSE, 133. <https://doi.org/10.1115/1.4005313>
- Meier, A, Kaufmann, M (2016): SQL- & NoSQL-Datenbanken. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47664-2>
- Sauer, C, Schleich, B, Wartzack, S (2018): Deep learning in sheet-bulk metal forming part design. In: Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Design Conference (DESIGN) 2018, Dubrovnik. Design Society. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0147>
- Vajna, S, Weber, C, Zeman, K, Hehenberger, P, Gerhard, D, Wartzack, S (2018): CAx für Ingenieure. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54624-6>
- Wiese, L (2015): Advanced Data Management. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH. ISBN: 978-3110441406

## Kontakt

Christopher Sauer, M.Sc.  
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
 Martensstraße 9  
 91058 Erlangen  
[www.mfk.tf.fau.de](http://www.mfk.tf.fau.de)



# Predictive Quality Management mit modellbasierten Services in kollaborierenden Netzwerken

Andreas Trautheim-Hofmann

Die seit Jahren anhaltende digitale Transformation erfährt durch neue, innovative Prozesse, Methoden und Technologien erneut ein atemberaubendes Wachstum in allen Bereichen. Entlang eines jeden Produktlebenszyklus werden unter den aktuellen Trends wie z.B. Systems Engineering, Industrie 4.0 und Internet of Things vielfältige Lösungen geschaffen, um vor allem die digitale Repräsentanz eines Produktes sowie der zu deren Herstellung notwendigen Produktionsmittel und der betreffenden Umgebung beim Betrieb des Produktes zu erschaffen bzw. auszubauen. Die digitale Repräsentanz, der sog. „Digitale Zwilling“ (oder auch "Digitale Schatten") dient vor allem dazu, die Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit aller produktrelevanten und -bezogenen Informationen sicherzustellen und für unterschiedlichste Szenarien und Stakeholder nutzbar zu machen. Die Informationen im Product Life-cycle Management (PLM) durchlaufen dabei unterschiedliche Reifegrade. In den Spezifikationsphasen werden die Informationen im Soll-Zustand auch gern als „Digitaler Master“ bezeichnet. Abbildung 1 ist eine vereinfachte Darstellung digitaler, produktrelevanter Informationen im PLM.

## Qualitätsinformationen im Produktlebenszyklus

Bestandteil dieser Informationen sind die geforderten und, unter unterschiedlichsten Einsatzbedingungen, tatsächlich erreichten qualitativen Eigenschaften eines Produktes oder einzelner Komponenten darin. Es gibt heute eine ganze Reihe von Modellen, Standards und Empfehlungen für die Qualitätsmanagement (QM) Prozesse und Methoden, auch einschließlich von Feedbacksystemen bzw. einer Rückversorgung an die qualitätsspezifizieren-

den Bereiche, wie z.B. mit dem EFQM Enterprise Feedback Management Modell, die EN ISO 9001 bzw. EN ISO 9004, Six-Sigma, KVP, IATF 16949:2016, CMMII, QS-9000 oder VDA 6.1, um nur einige zu nennen. Dem gegenüber stehen jedoch heute eine Vielzahl unterschiedlichster, proprietärer Modelle, Schnittstellen und Formate für das Management der qualitätsrelevanten Informationen in der Umsetzung. Nachvollziehbarkeit vom Soll zum Ist, Rückkopplungen vom Ist zum Soll oder gar eine vorausschauende Qualitätsplanung bzw. Sicherstellung sind derzeit noch mit unverhältnismäßigen Aufwendungen verbunden oder werden damit nahezu unmöglich.

In den bisherigen Prozessen zur Sicherstellung der definierten Produktqualität waren/sind technische Zeichnungen Schlüsselemente im technischen QM-Prozess. Hier sind die zu prüfenden, qualitätsrelevanten Informationen einer jeden Produktkomponente im Soll spezifiziert (Abbildung 2), welche in den Folgeprozessen die Mess- und Prüfplanung, die Programmierung bzw. Handhabung der Mess- und Prüfmittel, die Durchführung der Messung sowie Auswertung der Messergebnisse beeinflussen (Abbildung 3).

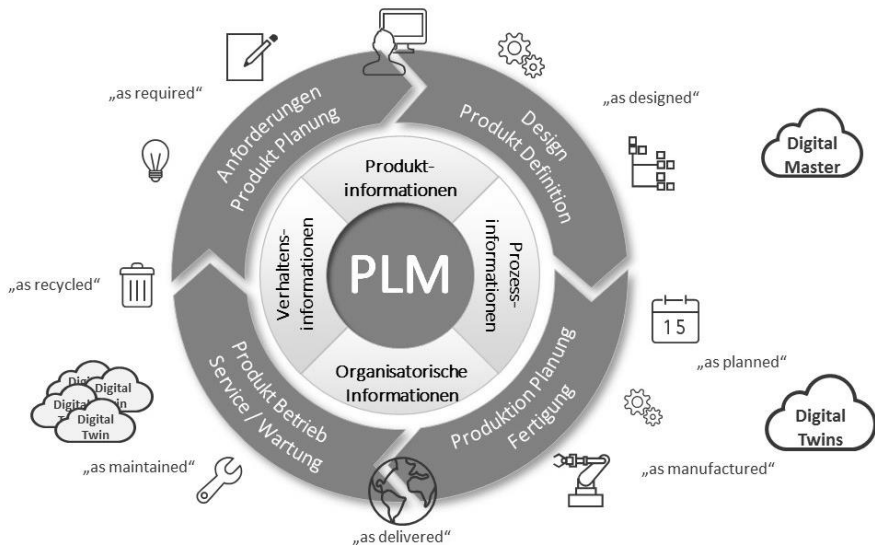


Abbildung 1: PLM Informationen im Produktlebenszyklus



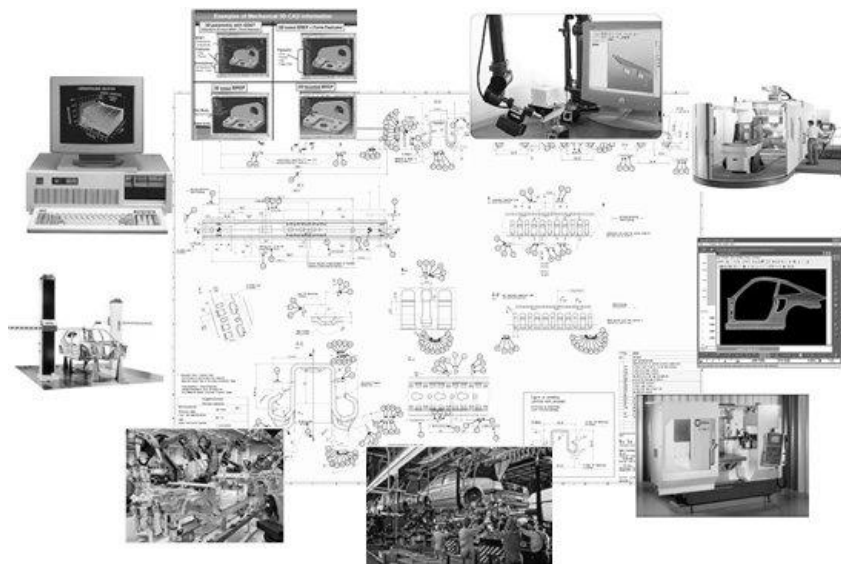


Abbildung 2: Technische Zeichnungen als Master für Qualitätsmerkmale von Produkten

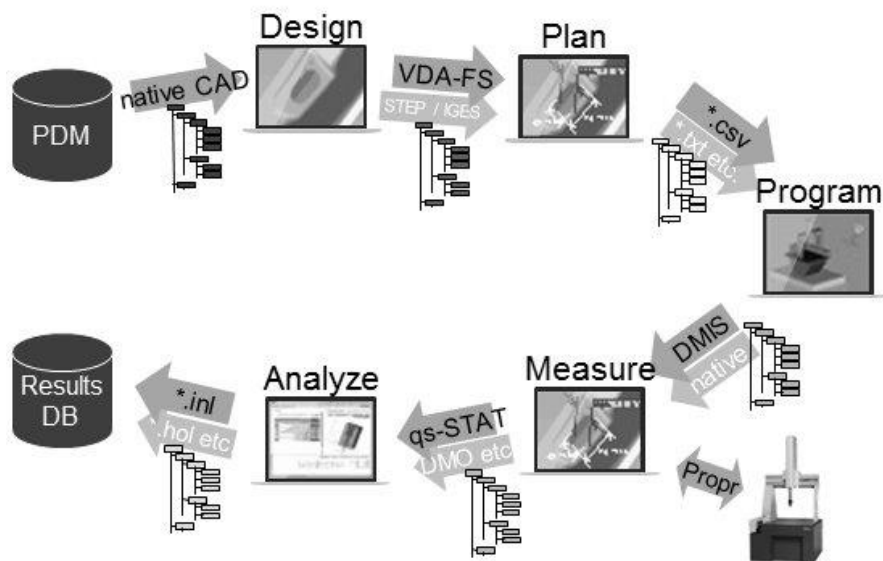


Abbildung 3: Datenfluss im heutigen Qualitätssicherungsprozess (Ipp 2017)

Dabei werden verschiedenste Messverfahren und -einrichtungen eingesetzt. Sie unterscheiden sich in den funktionalen Eigenschaften wie der Art der Datenerfassung (z.B. berührende oder nicht berührende), Art der Messdatenverarbeitung sowie in der Tiefe der Integration mit den Fertigungseinrichtungen. Die heutige Vielfalt der Prüfverfahren und Messgeräte sowie der steigende Bedarf an die Integrierbarkeit in die bereichsübergreifenden PLM-Prozesse sowie in firmenübergreifende Zusammenarbeitsmodelle erfordern auch eine Harmonisierung und Standardisierung im Umgang mit den qualitätsrelevanten Informationen. (Ipp 2017)

Weitere Treiber für die Standardisierung produktbezogener Qualitätsinformationen sind:

- der hohe manuelle Aufwand für die Nacharbeiten im Qualitätsprozess, d.h., die geforderte Produktqualität einschließlich der passenden Methoden und Prinzipien wird zu oft noch „erprobt“ bzw. „er-kontrolliert“ statt von vornherein, vorausschauend spezifiziert
- eine fehlende Prozesssicherheit durch ein durchgängiges und nachvollziehbares Änderungsmanagement bzgl. der qualitätsrelevanten Prozesse, Methoden, Daten, Systeme und Tools
- eine unzureichende bis keine Vergleichbarkeit von Messergebnissen (z.B. taktiler und optischer Messverfahren)
- ein aufwändiger Umgang mit der Vielfalt von Datenformaten mit gleichem Inhalt in den Messprozessen
- eine Beschränkung der Interoperabilität der Systeme durch proprietäre Datenformate, d.h., die Austauschbarkeit von Hard- und Software ist stark eingeschränkt
- ineffiziente Prozesse, welche steigende Kosten verursachen aufgrund von Redundanz und dem Fehlen von Standards in den firmenübergreifenden Kollaborationsnetzwerken

Zur Beherrschung der vielfältigen, funktionalen Anforderungen und der sich daraus ergebenden Komplexität hoch integrierter Produkte z.B. in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik, dem Anlagen- und Maschinenbau, dem Schiffbau oder auch dem Schienenfahrzeugbau werden immer mehr klassische, dokument- bzw. zeichnungsbasierte Pro-

zesse durch modellbasierte Methoden ergänzt oder substituiert. Die modellbasierten Ansätze und Methoden dienen vor allem auch der Simulation komplexer Zusammenhänge, um z.B. Vorhersagen treffen zu können bzgl. des Verhaltens eines Produktes oder auch zur Validierung und Verifikation bestimmter Produkteigenschaften.

## I++ DMS – Inspection PlusPlus Data Model Services

Vor mehr als 10 Jahren hat sich eine Arbeitsgruppe von Automobilherstellern und Zulieferern formiert, mit dem Ziel, eine standardisierte Schnittstelle für alle Informationen, welche innerhalb des Messprozesses benötigt werden zu spezifizieren, um hochautomatisierte Prozesse sowohl firmenintern als auch im firmenübergreifenden Netzwerk der Zusammenarbeit zu implementieren. Das Ergebnis ist ein Objektmodell, welches nicht nur die Informationen des Produktmodells, sondern auch die der Vorrichtungen und Hilfsmittel sowie der relevanten Prüf- und Toleranzinformationen (ein Teil der sog. PMI - Product and Manufacturing Information) enthält einschließlich ihrer Bezüge zur geometrischen 3D-Gestalts-Beschreibung eines Produktes, welche selbst wiederum Teil der Qualitätskriterien ist. (Ipp 2008)

Das I++ Model unterstützt neben dem Hauptanwendungszweck servicebasierter Applikationen aber auch eine filebasierte Kommunikation zwischen den Prozessbeteiligten (Abbildung 4).

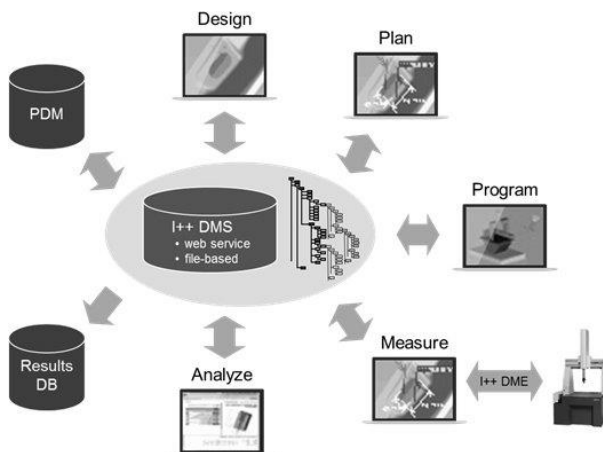


Abbildung 4: I++ DMS als standardisierte Schnittstellen zwischen den Prozessbeteiligten im QM

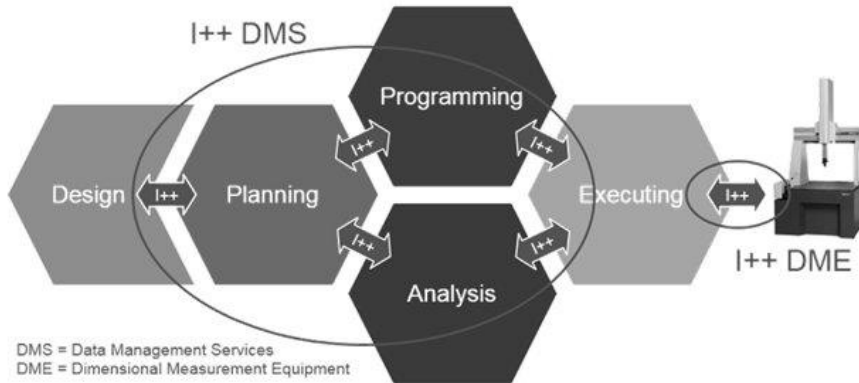


Abbildung 5: Unterstützung des Messprozesses durch I++ DMS und I++ DME

In kontinuierlicher Weiterentwicklung (Ipp 2009, Ipp, 2014, Ipp, 2017) bieten die I++ DMS heute die Fähigkeiten, Qualitätsinformationen von der frühen Entwurfsphase in den Entwicklungsprozessen, über die inline oder offline Erfassung von Messergebnissen während der Herstellung von Produkten bis hin zur Erstellung von Qualitätsberichten als Teil der Produktdokumentation durchgängig zu beherrschen (Abbildung 5).

In Erweiterung der I++ DMS wurde parallel I++ DME (Inspection PlusPlus Dimensional Measurement Equipment) als Spezifikation für den Informationsaustausch zwischen Koordinatenmessgeräten (KMG) und den Anwendungssoftware-Systemen entwickelt und abgestimmt. Mithilfe dieses objektorientierten DME-Modells wurde ein skalierbares Datenmodell zur Kommunikation mit der Messmaschine erstellt. Über diese standardisierte Schnittstelle erhalten Anbieter von Messsoftware transparenten Zugriff auf die Funktionalitäten des KMG ohne spezifische Kenntnis von der genauen Funktionsweise der Maschine haben zu müssen. Hierdurch wird es dem Hersteller des KMG ermöglicht, seine Kernkompetenzen zu schützen und dem Anwender gleichzeitig die Möglichkeit zu geben, das Messgerät über einen offenen Zugang anzusteuern. Darüber hinaus definiert I++ DME klare Systemgrenzen mit entsprechenden Verantwortlichkeiten bezüglich der Genauigkeit von Messmaschine und Anwendungssoftware. [Gläser 2010]

Mit der aktuellen Version 3.0 der I++ DMS werden wichtige Erweiterungen zur vollständigen digitalen Transformation von 3D Qualitätsinformationen

entlang des gesamten Produktlebenszyklus zur Verfügung gestellt. Abgeleitet aus den Q-Kriterien eines digitalen Masters sind Prüfpläne und ihre Elemente Basis für die Programmierung der Messmaschinen und die Ausführung der Messungen. Die taktilen und optischen Prüfergebnisse eines digitalen Zwillings sind entscheidend für das Reporting und die Rückmeldungen z.B. an die Entwicklung oder Produktion. Zu den Erweiterungen der V3.0 zählen beispielsweise eine Gültigkeitssteuerung für variantenreiche Prüfpläne und -prozesse sowie Referenzen auf die Messprinzipien und gewählten Prüfmethoden sowie die Messmaschinen, Prüfvorrichtungen und Hilfsmittel als Schnittstelle zum I++ DME. Außerdem wird im Schema eine verbesserte Abbildung der Messergebnisse und Reports unterstützt. Mit dem neuen I++ DMS Schema wurden darüber hinaus technische Anpassungen für eine verbesserte Abwärtskompatibilität und Erleichterungen zu deren Implementierung vorgenommen.

Das Modell unterstützt damit im Wesentlichen die folgenden Klassen (Ipp 2019):

- die Produkte bzw. Bauteilinformationen einschließlich der notwendigen Strukturen und geometrischen Referenzen
- die abgeleiteten Qualitätskriterien, Prüfelemente und -geometrie im Soll (Digitaler Master) zusammengefasst in entsprechenden Prüfplänen mit den Referenzen auf die PMI, geometrischen Referenzsystemen und Ausrichtungen
- die Messstrategien und gewählten Messprinzipien sowie Gültigkeitskriterien
- die Referenzen auf die Prüfprogramme und Ressourcen
- die einzelnen Prüfaufgaben
- die tatsächlich geprüften Produkte bzw. Bauteile mit den ermittelten Prüfergebnissen im Ist, abgebildet in den Digitalen Zwillingen
- die Analysen und Reports mit dem Soll-Ist-Vergleich

## Vorausschauendes Qualitätsmanagement

Auf Basis der I++ DMS können neue, partner- und systemübergreifende Schnittstellen im QM-Prozess realisiert werden, um die Lücken zwischen Design, Toleranzmanagement, Messprozess und -systemen zu schließen. Mit

der im Modell immanenten, bidirektionalen Nachvollziehbarkeit, können die Festlegungen zur Produktqualität (Abbildung 6) jetzt aber auch systemunterstützt optimiert werden.

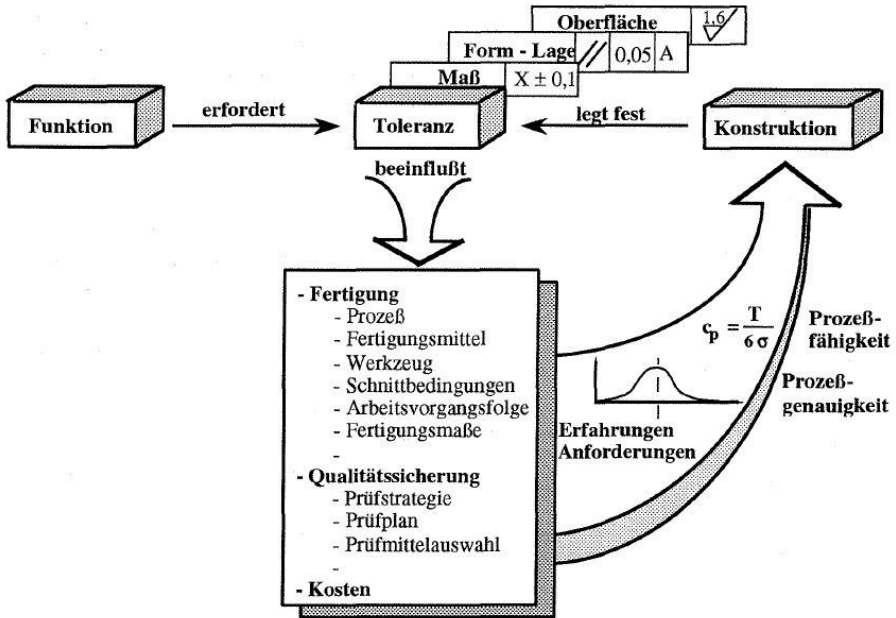


Abbildung 6: Toleranzfestlegung im Konstruktionsprozess (Holland 1994)

Für eine geforderte Funktionalität bzw. Produktlösung ist nach (Holland 1994) das Einhalten einer funktional erforderlichen Toleranz notwendig. Die konstruktiven Festlegungen beeinflussen dabei die nachgelagerten Bereiche teilweise ganz erheblich in Bezug auf die Fertigungsverfahren sowie die Qualitätssicherungsprozesse und die damit verbundenen Kosten. Die modellbasierten Services bieten hierbei eine Basis für unterschiedliche (vorausschauende) Qualitätsmanagementanwendungen (Abbildung 7).

Standardisierte Modelle, wie die von den Projektgruppen „3D Measurement Data Management Workflow und Implementor Forum“ des prostep ivip Vereins gleichermaßen zwischen Anwenderfirmen, Messsystemherstellern und Messsoftwareanbietern abgestimmten I++ Data Modell Services sind eine Voraussetzung für eine effiziente, fachbereichs- und firmenübergreifende

Kommunikation von Qualitätsmanagementinformationen in Partnernetzwerken.

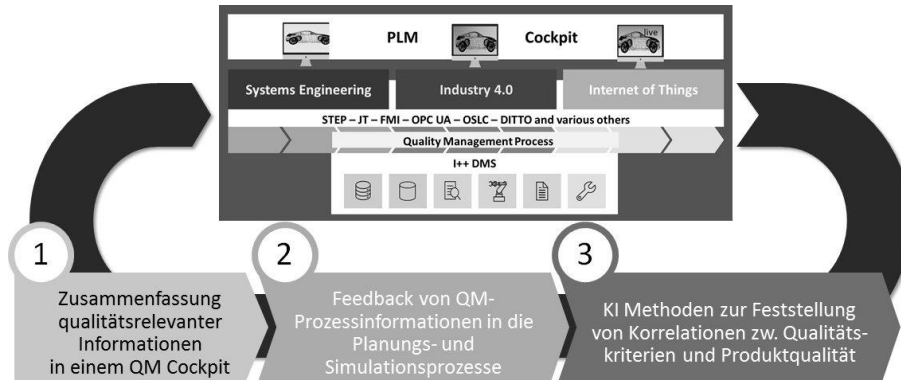


Abbildung 7: Anwendungsbeispiele im Predictive Quality Management

## Literaturverzeichnis

- Gläsner, Kai Henri 2010: Herstellerneutrale Schnittstellen I++ in der Koordinatenmesstechnik. Anwendungen, Möglichkeiten und Grenzen. In: Koordinatenmesstechnik 2010: Technologien für eine wirtschaftliche Produktion, VDI-Berichte. Bd. 2120. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2010 — ISBN 978-3-18-092120-4, S. 261–268
- Holland, M. 1994: Prozeßgerechte Toleranzfestlegung – Bereitstellung von Prozeßgenauigkeitsinformationen für die Konstruktion. Dissertation, TU Clausthal, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 137, Düsseldorf: VDI Verlag
- Ipp 2008: Biedenbach, H.-M., Stoll, J., Tiringer, H., Umlauf, W., & Gläsner, K. (2008). I++ DMS - Data Management Services Version 1.0.
- Ipp 2009: Disch, A., Stoll, J., & Zimmermann, D. J. (2009). I++ DMS - Data Management Services Version 1.1.
- Ipp 2014: Tiringer, H., Niemann, K.-P., Heinrichs, N., Disch, A., Heinz, S., Köhn, S., & Langhojer, F. (2014). I++ DMS - Data Management Services Version 2.0.
- Ipp 2017: PSI 17 / VDA 5602 3D Messdatenmanagement mit I++ DMS / Version 2.1 / Juli 2017
- Ipp 2019: PSI 17 / VDA 5602 3D Messdatenmanagement mit I++ DMS / Version 3.0 / Herausgabe geplant für Mai 2019

## **Kontakt**

Dipl.-Ing. Andreas Trautheim-Hofmann  
PROSTEP AG  
Dolivostr. 11  
64293 Darmstadt  
*[www.prostep.com](http://www.prostep.com)*



# Softwareentwicklung ECM/WCM im Spannungsfeld KMUs–Großunternehmen

Oliver Schwarz und Christian Kowalewski

Der BIM-Standard hat in den letzten Jahren viel Bewegung in die Softwarelandschaft gebracht. Der Wunsch und die Notwendigkeit, Daten aus der EMC Landschaft mit den digitalen Daten der Planung und dem aktuellen Progress auf den Baustellen zu verbinden, stellt hier einen besonderen Motor dar.

Die digitale Bauakte – nur ein Traum?

Unternehmen unterschiedlichster Größe und Ausrichtung begleiten durch Ihre Tätigkeiten einen Neu- bzw. Umbau von der Idee bis zur Realisierung. Die Lösungsansätze bzw. Lösungen der Digitalisierung in den verschiedenen Ausprägungen, Tiefen und Teilbereichen existieren.

Eine Lösung, die von den KMUs bis hin zu den Konzernen genutzt wird, haben wir aus dem Blickwinkel der Planer, Betreiber und Montageunternehmen im industriellen Anlagenbauumfeld (Industrie- und Produktionsanlagen aller Art) nicht gefunden.

Die Lösung von inactio und ESZETT schaut aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln auf die Kunden. Die Abbildung 1 reißt das Spannungsfeld ein wenig an. inactio/eebos begleitet Ihre Kunden im Umfeld von onbase, SAP und digitalen Archiven. ESZETT kommt mit ihren Erfahrungen der Planungswelten, VR-Systemen und dem WCM-System bee aus der Planungs- und Montagebegleitung. Der Wunsch, mit einer kleinen Lösung zu beginnen (KMU), die bei den einzelnen Unternehmen für ihre Belange genutzt werden kann, hin zu der Vernetzung und der Möglichkeit des Einbindens dieser ‚Inseln‘ in einem Gesamtprojekt mit allen technischen Möglichkeiten und Verknüpfungen, soll kein Traum bleiben.

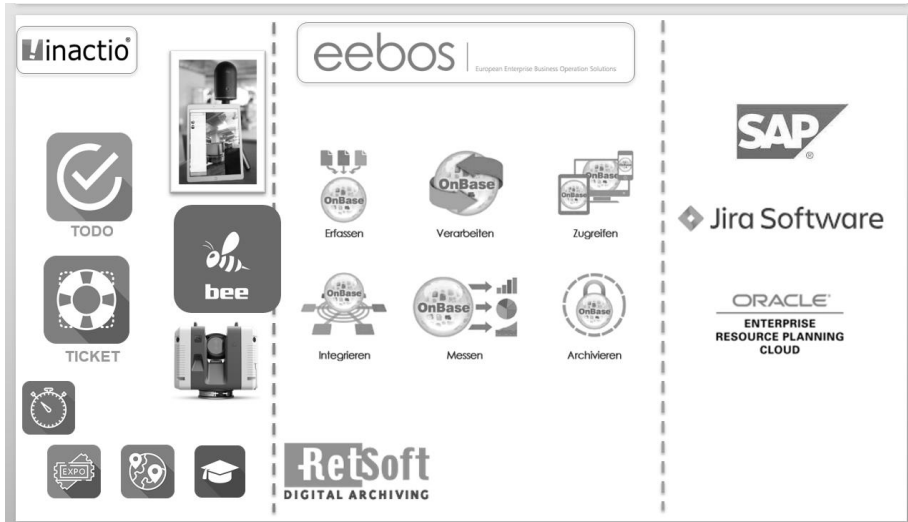


Abbildung 1: eine mögliche Softwarelandschaft der digitalen Bauakte

Es entsteht bei durchgängiger Nutzung der Lösung von ESZETT/inactio quasi ein gefühltes ‚Google Plant‘. Wichtig: Jedes einzelne heute existierende Modul und jedes weitere kann, insoweit die Funktionalität es erlaubt, separat genutzt werden.

Die Struktur erlaubt einen großen Freiraum in der Nutzung von anderen Tools, welche, wenn erforderlich und sinnvoll, in das Konzept mit eingebunden werden. Daten aus unterschiedlichsten Systemen werden in Relation gesetzt und können in einem vordefinierten Workflow bearbeitet und genutzt werden.

Daten aus:

- Digitalen Archiven wie RetSoft
- PDFs
- CAD-Daten (Autodesk, Microstation, Aveva, Intergraph, etc.)
- Dokumentenmanagementsysteme (z. B. PKM)
- Abrechnungstools
- Digitale Personaldaten

## Über die ESZETT GmbH & Co. KG

Das Unternehmen mit Sitz in Duisburg und einer über 15-jährigen Entwicklung begleitet mit Hilfe von zukunftsweisenden Technologien der 3D-Visualisierung und Datenaufbereitung erfolgreich die Planung und den Bau von Neu- und Umbauplanungen der Industrie.

Zwei Schwerpunkte werden durch ESZETT bedient. Die Dienstleistungen mit den Schwerpunkten:

- VR-Reviews aller gängigen 3D-Daten inkl. der Messpunktwolken
- Bestandserfassung mittels Laserscanning und weiteren Vermessungsmethoden
- Training von Personal auf Basis von digitalen Daten
- Betrieb, Instandhaltung, Sicherheit
- Projektmanagement mit bee, Consulting

Der zweite Bereich, Softwareentwicklung und Vertrieb, wird durch die jahrelange Erfahrung gespeist und vorangebracht.

## Kennen Sie dieses Szenario?

Das Projekt startet, die Planung beginnt, kurze Zeit später gibt es das erste Meeting, ein Design-Review folgt einem Concept-Review, verfahrenstechnische Fragen und Liefertermine werden diskutiert, manchmal geht es zwei Schritte zurück und einen vor. Das ist ein häufiger Ablauf im Planungsprozess.

Die Ergebnisse aus den unterschiedlichsten Reviewtools, klassischen Projekt-sitzungen und anderen Meetings zentral und einfach strukturiert zu verwalten, stellt eine Herausforderung dar. Eine Aufgabe, die wir mit bee lösen.

Das aktuelle Produkt bee2.0 ist so modular aufgebaut, so dass eine Nutzung von vielen Modulen in der digitalen Bauakte erfolgt.

## Daten zentral verwalten mit bee

Actionpoints, Review-Ergebnisse, Abnahmedaten, Besprechungsergebnisse, Aufgaben, Protokolle, Notizen usw. werden aus verschiedenen Quellen zu-

sammengeführt und in bee einheitlich verwaltet. bee bietet Ihnen eine zentrale Lösung, die Struktur in die Projektschritte bringt.

Im Anschluss beginnen die Arbeiten auf der Baustelle. Erste Fragen treten auf, Abnahmen und Freigaben stehen an. Parallel wird aber immer noch geplant, verworfen, geplant. Viele dieser Ergebnisse und Veränderungen haben Auswirkungen auf die bereits gestartete Realisierung bzw. führen zu iterativen Schritten: Baustelle -> Planung -> Baustelle → Planung usw...



Abbildung 2: VR im Einsatz

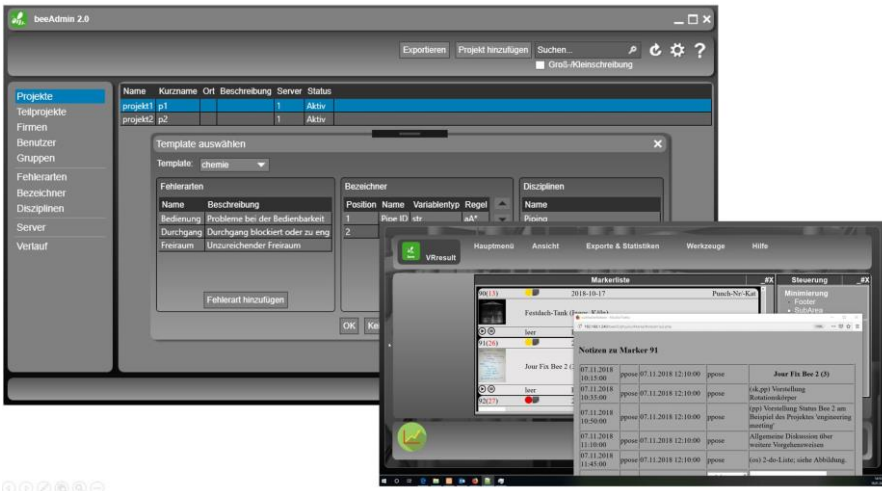


Abbildung 3: beeAdmin

## Über die inactio GmbH

Das Moerser IT-Systemhaus inactio unterstützt Unternehmen erfolgreich dabei, Prozesse und Abläufe in die digitale Welt zu überführen und von der dadurch gewonnenen Effizienz nachhaltig zu profitieren. Das Erfolgsgeheimnis ist die Konzentration auf das Wesentliche.

Händische Prozesse mit hoher Fehleranfälligkeit, isolierte Insellösungen in der IT, die Transparenz und Flexibilität beim Informationsaustausch verhindern: Unternehmen wüssten um die Notwendigkeit der durchgängigen Digitalisierung ihrer Prozesse, ließen sich aber häufig von marktgängiger Software abschrecken, die mit Funktionen überfrachtet sind und viel Arbeit bei Konfiguration und Wartung bedeuten. „Dem setzen wir unser Konzept der ‚schlanken Tools‘ entgegen, die man einfach in dem Umfang nutzen kann, der gerade gebraucht wird.“ Im Fokus des 2003 gegründete Systemhauses stehen die eigenentwickelten „Lifeline“-Anwendungen. Sie decken wichtige Organisations- und Kommunikationsprozesse ab, wie z.B. Messe- und Eventplanung, Bearbeitung von Service Tickets, Aufgabenverwaltung in Projekten oder unternehmensweites E-Learning. Die „Lifeline“-Tools sind in ihrer Bedienung auf das Wesentliche reduziert und können vollständig online genutzt werden, ohne dass eine Installation beim Anwender vor Ort erforderlich ist. Die Produktreihe wächst kontinuierlich.

inactio GmbH unterstützt mit folgenden Lösungen:

- Life-Line Tools:
- Das Nötigste – aber davon alles!

inactio® Lifeline: Dahinter steht Software, mit der Sie Ihre Geschäftsprozesse bei sich im Unternehmen anwenderfreundlich, kostengünstig und sicher umsetzen können.

In die inactio® Lifeline fließen über 20 Jahre Erfahrung und Know-how ein – nicht nur, was Entwicklung, Infrastruktur und Betrieb betrifft, sondern auch zu den speziellen Prozessen, An- und Herausforderungen des Mittelstandes.

Die inactio® Lifeline: IT ganz individuell und unkompliziert – auch für Sie!

## Über die eebos GmbH

Die eebos GmbH ist ein IT-Beratungsunternehmen und Lösungsanbieter aus Moers. Der Fokus liegt auf Enterprise Content Management (ECM), bei dem alle relevanten Inhalte zur Unterstützung von Unternehmensprozessen zusammengeführt und strukturiert bereitgestellt werden. Das eebos-Managementteam verbindet mehr als 20 Jahre ECM-Führungserfahrung bei namhaften internationalen Unternehmen. „Unser ganzheitlicher Ansatz verfolgt das Ziel, den Kunden leistungsstarke, zukunftssichere Infrastrukturen, Prozesse und Anwendungen verfügbar zu machen, mit denen sie ihre Informationsbasis einfach und anforderungsorientiert verwalten und einsetzen können“, erklärt eebos-Geschäftsführer Christian Kowalewski. eebos ist DACH-Distributor für die Archivlösung RetSoft Archiv und Europa-Vertriebspartner für OnBase ECM.

eebos GmbH unterstützt mit folgenden Lösungen:

### OnBase

Transformieren Sie Ihr Unternehmen digital, indem Sie Ihre Inhalte, Prozesse und Fälle auf einer einzigen ECM Plattform mit verwalten. Ganz gleich, ob Sie die Lösung für eine Abteilung oder für das gesamte Unternehmen einführen, die Produktivität wird gesteigert, Betriebskosten werden gesenkt und Risiken minimiert. Verbessern Sie den Service, indem Sie sicherstellen, dass Ihre Mitarbeiter immer Zugang zu allen benötigten Informationen haben.

Ihre IT-Abteilung profitiert von OnBase, weil es auf einer einzigen ECM Plattform neue Anwendungen erstellen und bestehende zusammenführen kann, was die Anwendungszahl reduziert. Da nur ein einziges System unterstützt, gepflegt und aktualisiert werden muss, fallen keine hohen Betriebskosten an.

Die OnBase-Produktsuite ist auf einer einzigen Datenbank, einer Codebasis und einem Content-Repository aufgebaut. Die OnBase-Plattform wird regelmäßig aktualisiert, um sicherzustellen, dass OnBase mit den Branchentrends und Technologie-Innovationen Schritt hält.

## RetSoft

RetSoft ist seit 1997 auf dem Markt und war eines der ersten digitalen Archive, bei dem man gescannten Dokumenten eigene Schlüsselwörter hinzufügen konnte. Seitdem haben sich Texterkennungs-/ Suchfunktionalität und die Verwaltung digital erstellter Dokumente ständig verbessert:

- Die integrierte Suchmaschine bezieht alle vorhandenen Dateitypen ein: gescannte und digitale Dokumente, Excel-Tabellen, E-Mails inkl. Anhänge, CAD Zeichnungen bis DIN A0 u. v. m.
- Neue Dokumente lassen sich regelbasiert in gewünschten Ordnern ablegen.
- Die E-Mail-Archivierung erfolgt direkt aus dem Mailprogramm heraus (Outlook, Thunderbird).
- Scans aus Multifunktionsdruckern können direkt im gewählten Archivordner abgelegt werden.
- RetSoft-Archive sind auch über den Webbrowser abrufbar, Inhalte lassen sich überall auf beliebigen Endgeräten abrufen.
- RetSoft erfüllt alle gesetzlichen Anforderungen an die digitale Archivierung, u.a. über die detaillierte Zuweisung von Berechtigungen auf Ordner- und Dateiebene.

Auf diese Weise ist sichergestellt, dass alle Nutzer des Systems sofort die Funktionalität vorfinden, die ihrer Rolle entspricht.

Viel Erfahrung für die digitale Bauakte.

Der BIM-Standard spielt bei der Realisierung eine wichtige Rolle und ist im Workflow berücksichtigt. Über die bee-Module CAD2VR werden Formate wie IFC und BCF gelesen und geschrieben.

## Kundenerfahrungen

Die digitale Bauakte ist ein Prototyp, die anderen aufgezeigten Möglichkeiten/Module und Applikationen sind keine ‚Zukunftsmusik‘, sie sind Stand der Technik und werden in unterschiedlicher Tiefe von verschiedenen Unternehmen bereits heute erfolgreich genutzt. Als Beispiel sei hier das Projekt API bei

Bayer in Wuppertal.-Elberfeld genannt. bee begleitete das Projekt über mehrere Jahre bis zur Inbetriebnahme im April 2018. Die Anforderungen aus den laufenden Projekten erweitern sich stetig.



Abbildung 6: Auszüge aus dem Artikel Pharma + Food Februar 2017

## Ausblick – Zusammenfassung

Die Bündelung des Reviewprozess endet nicht in der Planungsabteilung. Viele weitere Schritte erfolgen in der Vormontage und auf der Baustelle. Auch diese Informationen müssen in den Reviewprozess eingebunden werden. Die Nutzung der mobilen Endgeräte zählt hier dazu. Auch die Fragen der Nutzung von Daten in einer Cloud spielen hier eine wichtige Rolle. Die übergreifende Digitalisierung bringt viele neue Möglichkeiten und Anforderungen, die uns die nächsten Jahre intensiv beschäftigen werden, ob Forschungseinrichtung, Unternehmen oder Endanwender. Diese hohe Komplexität simpel zu gestalten ist die Herausforderung.

## Literaturverzeichnis

- Zupke, O. 2017: Mit Bienenfleiß zu mehr Planungssicherheit, Pharma + Food Ausgabe 02/2017, Verlag: Hüthig GmbH
- Schwarz, O. 2012: Virtual Reality im Lebenszyklus einer Industrieanlage, Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2012. Fraunhofer Verlag



Schwarz, O. 2013: bee –ein integrierter Workflow für VR im industriellen Anlagenbau, Tagungsband zu VAR²2013 – Realität Erweitern. Verlag Wissenschaftliche Scripten, Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr. h. c. Reimund Neugebauer

## **Kontakt**

Dipl.-Ing. Oliver Schwarz  
ESZETT GmbH & Co. KG  
Kulturstr. 55  
47055 Duisburg  
[www.eszett-vr.de](http://www.eszett-vr.de)

Christian Kowalewski  
Inaction solution GmbH  
Andreasstr. 48  
47441 Moers  
[www.inactio.de](http://www.inactio.de)